Theoretische und praktische Ermittlung von Koksofenwärmebilanzen.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

DISSERTATION.

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Carl Otto

aus Dahlhausen-Ruhr.

Referent:
Professor O. Simmersbach.

Korreferent:
Dozent Dr. E. Hollmann.

Tag der mündlichen Prüfung: **28. November 1913.**

Düsseldorf
Verlag Stahleisen m. b. H.
1914.

53771.

Theoretische und praktische Ermittlung von Koksofenwärmebilanzen.

Von der

Königl. Technischen Hochschule zu Breslau

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

DISSERTATION.

ACAD.
LUGD.BAT.
BIBL.

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. **Carl Otto**

aus **Dahlhausen-Ruhr.**

Referent:
Professor O. Simmersbach.

Korreferent:
Dozent Dr. E. Hollmann.

Tag der mündlichen Prüfung: **28. November 1913.**

Düsseldorf
Verlag Stahleisen m. b. H.
1914.

Dem Andenken von

Dr.-Ing. h. c. Gustav Hilgenstock

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41549813_0052

In der ersten Periode der Eisenindustrie diente die Holzkohle als Brennstoff. Diese zeigte eine große Zerreiblichkeit und vertrug wenig Druck, und die Oefen konnten daher nur mit kleinen Mengen von Erzen beschickt werden. Mit der Zeit erhob sich immer stärker das Bedürfnis nach einem härteren Beschickungsmaterial. Es gelang endlich, den Koks herzustellen, der schnelle und allgemeine Anwendung fand und die weiche Holzkohle verdrängte.

Beim Bau des ersten Koksofens nahm man sich natürlich den alten Meiler zum Vorbild. Der Brennstoff oder besser Koks, den der sogenannte Bienenkorbofen lieferte, erfüllte durchaus die eine Bedingung, die man vorläufig von ihm verlangte: er war fest. Es konnten jetzt Hochöfen gebaut werden, die größere Mengen Erze schneller verarbeiteten. Der Bienenkorbofen verbesserte sich mehr und mehr, und der Koks konnte immer billiger hergestellt werden.

Die aufblühende Eisenindustrie forderte die Herstellung von stetig wachsenden, gewaltigen Mengen Koks, und in Deutschland, Belgien und Frankreich dachte man viel über dieses wichtige Problem nach. Von hier ging auch die kühne, umwälzende Idee aus, die runde Bauart des Bee-Hive aufzugeben und zu einer langen, schmalen und hohen Form überzugehen. Das waren die Coppéeöfen, die ebensoguten Koks lieferten, aber ein weitaus höheres Koksausbringen erzielten.

In den achtziger Jahren ging man beim Otto-Hoffmann-Ofen an die Ausführung des lang gehegten Gedankens, die bei der Trockendestillation unausgenutzt entweichenden Gase aufzufangen, um die darin enthaltenen Nebenprodukte, Teer und Ammoniak, zu gewinnen. Man schätzte ihren Wert zwar damals noch nicht richtig ein. Die meisten befürchteten eine Ueberproduktion, wenn die Gewinnung der Nebenprodukte bei der Koksfabrikation allgemeiner und dadurch ein solches Sinken des Preises der Nebenprodukte eintreten würde, daß die Gewinnung derselben unrentabel wäre. Dr. C. Otto[1]) trat dieser oft laut gewordenen Befürchtung in seinem Vortrag in der Generalversammlung des Vereins deutscher Eisenhüttenleute vom 15. Juni 1884 energisch entgegen, indem er einige Zahlen angab, die beredtes Zeugnis ablegten von dem ungeheuren Verbrauch derselben.

Durch weitere Versuche und Berechnungen stellte man fest, daß die Gase aus den Regeneratoren bei so hohen Temperaturen entwichen, daß man nur einen Teil zur Beheizung benötigte, während man den Rest unter Dampfkessel schicken konnte. Die Rentabilität des Koksofenbetriebes steigerte sich erheblich, man produzierte nicht nur Koks und Nebenprodukte, sondern gewann Ueberschußenergien in Gestalt von Gasen und aus der Abhitze erzeugten Dampf. Die Beheizungsfrage des Ofens, das ökonomische Arbeiten desselben wurden noch vernachlässigt; den Hauptwert legte man auf möglichst hohes Koksausbringen und auf Gewinnung der Nebenprodukte. Den Ueberschußenergien schenkte man damals noch lange nicht die Beachtung wie heutzutage.

In der Generalversammlung des Naturhistorischen Vereins im Jahre 1896 wies G. Hilgenstock[1]) auf diese höhere Koksproduktion hin, die möglich war durch eine intensivere Beheizung der Ofenwände, und als Folge schnelleres Abgaren, wodurch bei 60 Oefen monatlich 700 D.-W. Koks, 10 D.-W. schwefelsaures Ammoniak und 30 D.-W. Teer geliefert werden, während früher 60 Oefen monatlich etwa 360 D.-W. Koks, 5 D.-W. schwefelsaures Ammoniak und 15 D.-W. Teer lieferten.

Den Ueberschußenergien im Ueberschußgas und in der Abhitze schenkte der Vortragende noch keine Erwähnung. Am Schluß seiner Ausführung kam G. Hilgenstock auf die Vervollkommnung des Koksofens durch seinen Unterbrennerofen zu sprechen. Doch er hob hier nur die Vorzüge des Ofens in bezug auf ein Mehrausbringen von Koks und eine erhöhte Ausbeute von Teer und Ammoniak hervor. Bei dieser Gelegenheit stellte er die zwei Kardinalforderungen für die Koksöfen zur Gewinnung der Nebenprodukte fest:

1. viel Koks und tadellosen Koks zu erzeugen;
2. die bei der Destillation entwickelten Nebenprodukte müssen erhalten und gewonnen werden.

Mit den Jahren steigerten sich die Garantiemöglichkeiten der Koksofenfirmen, und im Jahre 1902 besprach G. Hilgenstock[2]) in einem Aufsatz des Journals für Gasbeleuchtung das Problem des hohen Gasüberschusses und die Gestaltung und Menge der aus den Koksöfen zu gewinnenden Ueberschußenergien. Es stellte sich hierdurch den zwei Hauptforderungen eine dritte zur Seite, nämlich die möglichst verlustlose Verkokung der vorher in der Kohle enthaltenen Energie. Für die Gestaltung der Energie für Kraftzwecke, ob Gas oder Dampf bevorzugt würde, wäre allein die Entscheidung der Frage maß-

[1]) Dr. C. Otto, Vortrag, gehalten in der Generalversammlung des Vereins deutscher Eisenhüttenleute vom 15. Juni 1884 über „Die neuesten Resultate in bezug auf Gewinnung der Nebenprodukte bei Koksöfen."

[1]) G. Hilgenstock, Ueber neuere Koksöfen mit Gewinnung der Nebenerzeugnisse, Sonderabdruck aus den Verhandlungen des Naturhistorischen Vereins der preuß. Rheinlande, Westfalens und des Regierungsbezirks Osnabrück; 53. Jahrgang, 1896.

[2]) G. Hilgenstock, Ueber Destillations-Kokerei, Sonderabdruck aus dem „Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung", 1902.

gebend, ob die Energie besser in Dampf- oder Gasmaschinen ausgenutzt werden sollte. Für die Gewinnung von Leucht- und leicht transportablen Heizenergien käme nur die Erzeugung von Gas in Betracht.

Um einen Schluß über die mögliche Ueberschußenergie ziehen zu können, ist es unbedingt erforderlich, die für die Verkokung aufgewandte Energie genau zu erkennen und berechnen zukönnen. Denn so, wie nach einer Aussage von Gustav Hilgenstock der beste Koksofen mit Gewinnung der Nebenprodukte von letzteren nicht mehr liefern kann, als der Verkokungsprozeß entwickelt, so ist es ebenfalls unmöglich, einem Koksofen mehr Ueberschußenergien zu entziehen, als der Verkokungsprozeß für sich unbeansprucht läßt.

Immer größer wurden die Forderungen an möglichst hohen Ueberschußenergien seit dem Tage, da man erkannte, daß der Gaskoksofen seine Verwendung mit Gasmotoren finden und zur Beleuchtung größerer Städte dienen könnte. Die Angaben, auf Grund deren man einen genauen Schluß über die zum Verkokungsprozeß benötigte Energie ziehen könnte, sind durchweg roh und allgemein gehalten, oft in gänzlichem Widerspruch zueinander und ohne wissenschaftliche Genauigkeit.

Gustav Hilgenstock[1]) machte in seinem 1902 gehaltenen Vortrag (Journal für Gasbeleuchtung) zum erstenmal Angaben über eine Koksofenwärmebilanz. Er wollte dadurch, wie er sagte, die mannigfachen Wunderdinge über Gasüberschüsse bei diesem oder jenem neuen Koksofen aus der Luft schaffen. Diese Wärmebilanz ist mit einem Ueberschuß an Gas von 30 % als zu ungünstig anzusehen, während manche Herrn Hilgenstock von anderen Koksofenfirmen gemachte Angaben zu günstig angenommen sein möchten. Dies erklärt sich eben durch die Schwierigkeit, die es machte, die Verkokungswärme genau zu präzisieren. Besonders muß einem bei der genannten Aufstellung der hohe Verlust an Strahlung auffallen, wo doch bei der langgestreckten Heizwand des Koksofens mit ihrer großen Nutzfläche auf ein günstigeres Ergebnis zu rechnen gewesen wäre. Unberücksichtigt gelassen ist die Wärme, die zur Ueberwindung der äußeren Arbeit verbraucht wurde. Bei 1 kg Kohle mit einem Gasausbringen von 0,3 cbm würde dies 70 WE ausmachen. Diese wären demnach durch obige Bilanz durch exotherme Wärmeerscheinungen bei der Verkokung gedeckt worden.

Außerdem fand ich Wärmebilanzen, die den Heizwert der Kohle zugrunde legten. Ich führe drei an:

1. Fr. Schreiber[2]) bei einer Kokskohle von 73 % Koksausbringen:

3,0 % in der Kokshitze,
2,1 % in Gas und Teerdämpfen,
3,1 % für Strahlung,
1,8 % Abhitze.

2. Maschinenfabrik Nürnberg[3]):

3 % Erwärmung des Kokses,
1—2 % Abhitze,
3—5 % Strahlung.

3. O. Rau[4]) schätzt die Wärme bei einem Koks ausbringen von 70 bis 85 % beim Regenerativofen auf 10 bis 5 % der Wärme der Kohle. Nehme ich rd. 8000 WE für das kg Kohle, so wären das 800 bis 400 WE, die für die Verkokung benötigt würden.

Diese Angaben sind roh aufgestellt, und ich muß mich bei all diesen Zahlen über die hohen Strahlungsverluste wundern. Ich finde die Erklärung durch die allgemein verbreitete Annahme, daß der eigentliche Verkokungsprozeß ± 0 verläuft und der Rest auf Strahlung geschlagen wird, da sich der Wert für Abhitze, Wärme im Gas- und Wasserdampf und Wärme im Koks leichter und genauer ermitteln läßt.

Im September 1912 wies Eugène Lecocq[5]) darauf hin, wie wichtig es für den Abnehmer einer Koksofenanlage wäre, selbst berechnen zu können, wieviel seine Kohle an zugeführter Energie benötige, um dadurch unbedingte Klarheit über die Arbeitsleistung, kurz die Rentabilität des Ofens zu haben. Er stellte auf Grund seiner, ziemlich rund angenommenen Zahlen verschiedene Bilanzen auf, von denen ich eine herausgreife:

September 1912, S. 697:

Hitze im Koks	= 280 000
Teer, Wasser, Gas . . .	= 190 000
Strahlung	= 120 000
	590 000 WE f. d. t.

E. Lecocq nahm hierbei willkürlich 1000° für den Kokskuchen an und konnte daher nur einen annähernden Wert erzielen, während er die Strahlung willkürlich als die Hälfte der von M. Euchène für Gasretorten ermittelten Strahlung annahm. Aus Analyse des Verbrennungsgases, aus Temperatur und Zusammensetzung wird prozentual auf die Wärmemenge, die auf das cbm Gas dem Ofen durch die Regeneratoren zugeführt wird, geschlossen, und E. Lecocq findet auf diese Art einen Gasüberschuß von 38 %. Alle weiteren Bilanzen in diesem Heft und in den März- und Aprilheften 1913 sind auf ähnlich angenommene Grundlagen aufgebaut. Die Destillationswärme wird einfach unter Zugrundelegung der früheren Forschungsversuche, bei denen man die Wärme der Kohle mit der ihrer Destillationsprodukte verglich und höchstens Abweichungen von 1 bis 2 % fand, gleich Null angenommen. 1 bis 2 % macht bei 8000 WE für 1 kg Kohle schon 80 bis 160 WE aus, und da mit einem derartigen Fehler immer gerechnet werden kann, sind die Zahlen von E. Lecocq wohl nicht als einwandfrei nach dieser Richtung hin zu betrachten.

[1]) G. Hilgenstock, Ueber Destillations-Kokerei, Sonderabdruck aus dem „Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung", 1902.

[2]) Die Fortschritte in der Gewinnung der Nebenprodukte beim Kokereibetriebe; Bericht, dem Internationalen

[3]) Kongreß für Bergbau, Hüttenwesen, angewandte Mechanik und praktische Geologie, Düsseldorf 1910, erstattet

[4]) von O. Rau, Aachen, Sonderabdruck aus „Stahl und Eisen" 1910, Nr. 29 und 30, S. 26.

[5]) Revue de Métallurgie, September 1912.

Ich wurde noch besonders in meinem Argwohn bestärkt durch den Aufsatz, der schon sechs Jahre vorher, im April 1906, im Journal of Gas Lighting erschienen war. Verfasser des Aufsatzes „Some thermic considerations of a retort-furnace" ist D. D. Barnum. Er stellt im Gegensatz zu E. Lecocq genau die Strahlung fest und außerdem die Gesamtenergie, die für die Entgasungen benötigt wurden, und kommt dadurch zu folgender Bilanz:

Verbraucht:	B. T. U.
durch den Schornstein als Gas	88 855
durch den Schornstein als Wasser	31 943
in der Asche verloren	—
abgeführt durch Gas	15 503
„ „ Teer	4 070
„ „ Wasser	3 759
Strahlung und Leitung	20 931
im Koks	33 708
Bildungswärme	3 267
Balance	51 579
	B. T. U.
Hitze vom Koks	215 623
Bildungshitze	+ 37 992
zusammen	253 615

Hierdurch geht im Gegensatz zu vorigen hervor, daß der Destillationsprozeß an und für sich wärmeverbrauchend ist und nicht, wie nach Lecocq, als ± 0 angesehen werden darf.

Diese Widersprüche und Unklarheiten veranlaßten mich, gründliche Versuche auf diesem Gebiet anzustellen.

Meine Aufgabe sollte sein:

1. im Laboratorium genau in einem der Verkokung in der Praxis möglichst gleichkommenden Versuch die theoretische Gesamtenergie für die Verkokung unter Ausschluß der Strahlungsverluste bei verschiedener Temperatur zu ermitteln,

2. diese gefundenen Ergebnisse durch Aufstellung einer Wärmebilanz von Koksöfen in der Praxis zu bestätigen,

3. im Laboratorium Versuche mit verschiedenen Kohlen zu machen, und diese in bezug auf die zur Verkokung benötigten Energien zu vergleichen,

4. Betrachtungen anzustellen, wie und wo eine Verminderung der verbrauchten Wärme möglich wäre.

Erster Teil.

Als Energieform für meine Laboratoriumsversuche wählte ich die elektrische, da bei dieser am leichtesten genaue Messungen vorzunehmen waren. Von der Firma Aron, Charlottenburg, bezog ich einen Amperestundenzähler und ferner ein genaues Voltmeter. Nun hieß es, die Verkokung in einer Form auszuführen, bei der leicht und genau die gesuchte, für die Verkokung aufgewandte Wärme gemessen werden konnte. Ich umwickelte eine unten zugeschmolzene Porzellanröhre in gleichmäßigem Abstand mit 0,5 mm starkem Nickeldraht, der mit einer Mischung von Talkum und Wasserglas überzogen wurde, um ihn gegen Oxydation zu schützen. Das Ganze wurde in einen Kasten, der mit Asbestwolle möglichst isoliert worden war, eingebettet.

Zwei Wege konnte ich einschlagen:

1. Ich konnte einmal mit und einmal ohne Kohlenfüllung die Porzellanröhre mit möglichst hohem Stromaufwand auf eine bestimmte hohe Temperatur schnell erhitzen, um dann die Wärmemenge, verbraucht beim toten Versuch, von derjenigen bei Ausführung der Verkokung abzuziehen.

Es erwies sich aber als unmöglich, auf diese Weise die Kohle schnell genug zu erhitzen und so der Praxis möglichst entsprechende Bedingungen zu erzielen.

2. Der zweite Weg bestand darin, den Porzellanzylinder längere Zeit durch Ein- und Ausschalten des Stromkreises auf einer bestimmten Temperatur zu halten und dann über einen bestimmten Zeitraum die Strahlungsverluste festzustellen. Ueber einen bestimmten Zeitabstand wurde hierauf wieder der Wärmeverbrauch abgelesen, diesmal aber während dieser Zeit Kohle schnell in das Porzellanrohr eingefüllt und so eine Verkokung ausgeführt. Diese Wärmemenge weniger der als Strahlung in der vorigen Ablesung gefundenen gibt mir die für die Verkokung verbrauchte Wärme. Die Temperaturen wurden hierbei mit einem 0,2 mm starken Platinrhodium-Pyroelement in einer engen Porzellanröhre, die sich zwischen dem zur Verkokung dienenden Porzellanrohr und den Wicklungen befand, gemessen. Viele Mißstände zeigten sich.

Es gelang mir nicht, konstante Zahlen bei Ermittlung der Strahlung zu bekommen. Ich schob dies erstens auf die lange Zeit, die erforderlich war, bis sich gegenüber der Luft, die nicht schnell genug von den nur mäßig erwärmten Wandungen des Kastens die Wärme abführen konnte, ein Gleichgewichtszustand eingestellt hatte; und ferner war die gewählte Spannung im elektrischen Ofen noch zu hoch, und mein Amperestundenzähler zeigte daher zu geringen Ausschlag. Außerdem wurde mein Nickeldraht bei den hohen Temperaturen schnell brüchig, und nach zwei Versuchen war der Widerstand des Drahtes schon so gestiegen, daß die durchfließende Elektrizitätsmenge kaum noch den Ofen auf der gewünschten Temperatur halten konnte.

Diese Erfahrungen berücksichtigend, baute ich einen neuen Ofen. Ich nahm ein größeres Porzellanrohr für die Verkokung, um einen größeren Ausschlag zu bekommen. Der äußere Durchmesser betrug 40 mm. Als elektrischen Widerstand nahm ich Kohle, die in die Porzellanröhre eingefüllt wurde. In der Kohle steckte das Thermoelement. Die Kohle wurde gehalten von einem Asbestzylinder, der in Asbestwolle eingebettet war. Das Ganze stand in einem zylindrischen Gefäß, das sich in einem Gefäß mit Wasser befand.

Dieser Wasserbehälter hatte einen Zu- und Ablauf und konnte durch schnelleres oder langsameres Zufließenlassen von Wasser auf einer bestimmten Temperatur gehalten werden. Die Widerstandskohle

wurde durch Ein- und Ausschalten des Stromkreises ebenfalls auf ein und derselben Temperatur gehalten. Ich machte aber die Beobachtung, daß die Strahlungsverluste einmal übereinstimmten, dann aber wieder sehr voneinander variierten. Als Ursache sah ich die Ungleichmäßigkeit an, die durch teilweisen Abbrand in der gekörnten Widerstandskohlenfüllung auftreten mußte. Mein Thermoelement maß natürlich nur die Temperatur an einer kleinen Stelle der Kohlenfüllung. Durch Abbrand konnte diese mal fester, mal loser gegenüber der allgemeinen Kohlenfüllung sein.

Die notwendigen Folgen waren Schwankungen bei den verschiedenen Versuchen in den Temperaturen, wenngleich auch mein Thermoelement immer dieselbe Temperatur anzeigte, und ich mußte so auf verschiedene Werte für die Strahlung kommen. Ich war dadurch gezwungen, mich nach einer Erhitzungsmöglichkeit umzusehen, die gegenüber der Meßstelle immer dieselben Temperaturverhältnisse zeigte.

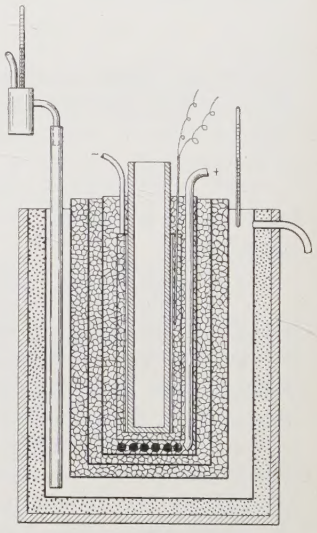
Ich wählte Platindraht als elektrischen Widerstand. Meine Vorversuche ergaben, daß ich bei sechsfach genommenem Platindraht von im ganzen 12 m Länge und 0,2 mm Stärke einen Stromverbrauch von 12 Amp bei einer Temperatur von 900° und einem Spannungsabfall von 60 Volt im elektrischen Ofen erhielt. Mein Amperestundenmesser vertrug eine Höchstbelastung von 15 Amp, und ich mußte bei einer Verkokungsmenge von 65 g und einer rund angenommenen Verkokungswärme von 500 bis 700 WE für das kg Kohle einen Ausschlag von 0,8 Amperestunden erhalten. Ich hatte den Apparat mit einer Skaleneinteilung bis zwei Stellen hinter dem Komma versehen lassen, und ich mußte so gute Zahlen erhalten. Ferner sollte die Porzellanröhre leicht auswechselbar sein, dann sollte sich die Meßstelle nicht mehr, wie bei früheren Versuchen, innerhalb der Wicklungen befinden, sondern in unmittelbarer Nähe außerhalb.

Befand sich die Meßstelle innerhalb der Spirale, so mußte hier bei der Verkokung notgedrungen eine Abkühlung stattfinden. Da durch Ein- und Ausschalten die Meßstelle auf derselben Temperatur zu halten war, so war jetzt der elektrische Widerstand höher zu erhitzen als bei dem toten Versuch zur Ermittlung der Strahlung.

Der Wert für Strahlungsverluste würde dadurch bei der Verkokung höher werden als der vorher ermittelte, und die notwendige Folge wäre ein Ergebnis zu hoher Wärmewerte, verbraucht für die Verkokung.

Den elektrischen Ofen baute ich folgendermaßen:

Ein Holzzylinder, 2 mm stärker als die zur Verkokung benutzten Porzellanrohre, wurde mit einer 1 mm starken Schicht einer Mischung von Talkum und Wasserglas überzogen. Ich ließ diese Schicht im Trockenschrank erhärten und wickelte dann in möglichst gleichmäßigem Abstand sechs 0,2 mm starke und 2 m lange Platindrähte parallel und spiralförmig auf diese Schicht auf. Die Enden wurden verbunden und mit einem stärkeren Platindraht zusammengedreht. Das Ganze wurde mit Talkum und Wasserglas bestrichen und dann um die Zylinder in Talkum und Wasserglas aufgeweichte Asbeststreifen gewickelt. Der Holzzylinder erhielt so einen 1 cm starken Mantel aus Asbest, Talkum und Wasserglas, an dessen Innenseite die Platindrähte eingebettet waren. Solange dieser Mantel noch weich war, wurde in halber Höhe ein Schlitz angebracht, bis die Platindrähte bloßlagen. In diesen bettete ich ohne Schutzrohr nur mit Isolierrohr ein 2 mm starkes Platinrhodiumelement, so daß sich die Lötstelle des Elementes möglichst in der Nähe des Platindrahtes der Wicklungen befand. Nun ließ ich den Mantel trocknen, und nach vollständiger Erhärtung setzte ich das Ganze, in Asbestwolle eingebettet, in ein zylindrisches Gefäß aus Eisenblech, das wiederum in einem mit Wasser angefüllten zylindrischen Gefäß ruhte, das mit einem Wasser-Zu- und -Ablauf versehen war. Die Platindrahtenden schloß ich an meine Stromleitung an, und der Ofen wurde erhitzt. Dabei brannte der Holzzylinder aus, und es konnten leicht in dem entstandenen Hohlraum Porzellanrohre, die ich für die Verkokung vorgesehen hatte, eingesetzt werden. Das im Asbestmantel eingelassene Thermoelement hatte lediglich den Zweck, das Temperaturgefälle konstant zu halten.



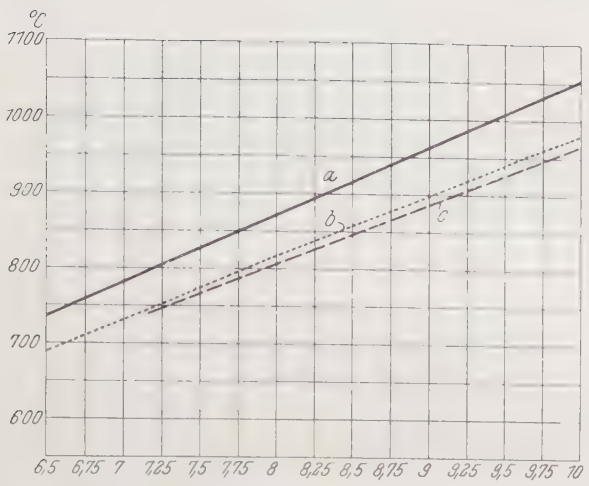
Elektrischer Ofen zur Bestimmung der Verkokungswärme.

Mit einem von der Phys.-chem. Reichsanstalt geeichten Thermoelement stellte ich die entsprechende Temperatur im Innern der eingesetzten Porzellanröhre fest, die naturgemäß hier höher sein mußte.

Zur weiteren Erläuterung des Ofens weise ich auf die obenstehende Zeichnung hin, durch die manches leichter erklärlich werden wird.

Bei meiner Anordnung reagierte das Thermoelement direkt auf Stromein- und -ausschalten, während bei dem früheren Element trotz Ausschalten des Stromkreises ein Ansteigen der Temperatur stattfand. Ich erreichte hierdurch, daß sich durch das im Innern der Röhre zur Ermittlung der Vergleichstemperaturen vorübergehend eingebaute Element kein Fallen oder Steigen der Temperaturen konstatieren ließ.

Obenstehende Kurve zeigt die Verschiedenheit der Temperaturen im Innern der Porzellanröhre gegenüber den gleichzeitigen Temperaturen an der Meßstelle des in den Asbestzylinder eingebauten



Vergleich des 0,2 mm Thermoelementes mit dem geeichten Element:
a = Geeichtes Element,
b = 0,2 mm Thermoelement,
c = 0,2 mm Thermoelement außerhalb der Platindrahtspirale eingebettet.

Thermoelements. Die Temperaturen in verschiedener Höhe der Röhre zeigt folgende Tabelle:

Temperaturen gemessen im leeren Rohr. Das geeichte Element im Rohr.

Galvanometer mit meinem 0,2-mm-Thermoelement. In der Spirale festliegend.		Galvanometer mit geeichtem Element.
760°	am Boden	7,39 Mill. Volt
760°	2,5 cm vom Boden	7,43 „ „
760°	6,5 „ „ „	7,42 „ „
760°	9,5 „ „ „	7,42 „ „
860°	am Boden	8,65 „ „
860°	2 cm vom Boden	8,7 „ „
860°	6,5 „ „ „	8,7 „ „
940°	2 „ „ „	9,67 „ „
940°	7 „ „ „	9,68 „ „

Man sieht aus derselben, daß die Temperaturen praktisch gleich sind.

Bei meinen Versuchen verfuhr ich folgendermaßen:

Durch Einschalten des Stromkreises wurde der innere Asbestzylinder auf die gewünschte Temperatur gebracht und durch Ein- und Ausschalten auf dieser Temperatur gehalten. Ebenfalls wurde das Wasserbad, in dem der kleine elektrische Ofen schwamm, durch ein stärkeres oder geringeres Zufließenlassen von Wasser auf der gewünschten Temperatur gehalten.

Ich ließ den Ofen so zwei bis drei Stunden gehen, so daß ich annehmen konnte, daß die Wärmemenge, die vom inneren Asbestzylinder durch die Isolationsschicht ins Wasser überging, eine konstante war.

In dem Stromkreis war mein Amperestundenmeter eingeschaltet; ferner war das Voltmeter angeschlossen, das mir genau den Spannungsabfall im elektrischen Ofen anzeigte.

Ich stellte nun durch Versuche die Strahlung des Ofens in der Zeiteinheit genau durch Messung der verbrauchten elektrischen Energie fest. Durch zwei übereinstimmende Ablesungen wurde mir bestätigt, daß der Wärmedurchgang die konstante erreicht hatte, und ich konnte daher annehmen, daß in der nun auszuführenden Verkokung die Strahlung nach außen die gleiche bleiben würde. Der Ofen wurde wieder auf derselben Temperatur gehalten und wieder der Verbrauch der elektrischen Energie über einen Zeitabstand gemessen. Diesmal wurde aber während dieser Zeit gepulverte Kohle in das im Asbestzylinder eingesetzte Porzellanrohr so rasch wie möglich eingefüllt. Die Differenz zwischen der nun verbrauchten Wärmeenergie und der durch Strahlung verloren gehenden Energie gab mir die für die Verkokung verbrauchten Wärmeeinheiten der trockenen Kohle.

Die Versuche wurden mit einer Kohle gemacht, die folgende Analysenergebnisse zeigte:

Die Kohle enthielt 12 % Wasser.

Tiegelausbringen:

Diese Zahlen sind das Datum der Probenahme:	11. 12. 13.	12. 12. 13.	13. 12. 13.
Koks	75,94	75,22	75,63
Asche	7,18	6,26	5,28
Wasser	0,68	0,68	0,38
Gesamtkohlenstoffbestimmung:			
C	80,54	81,66	83,18
H_2	4,62	4,5	4,3
O_2	6,98	7,34	6,22
Asche	7,3	6,5	6,3
Destillationsproben nach Dr. Bauer (15 g Einwage):			
Teerwasser	4,496	4,507	4,5
CO_2	1,429	1,405	1,095
C_6H_6	0,873	0,887	1,003
Teer	2,333	3,140	2,393
Dest. Koks	79,49	78,66	79,07
cbm Gas	0,0052	0,0054	0,0054
Gasanalyse:			
SKw	3,0	3,6	3,0
O_2	2,0	2,6	2,4
CO	6,2	5,6	5,2
CH_4	24,1	25,7	25,8
H_2	53,3	49,7	51,9
N_2	11,3	12,8	11,7

Diese zugeführte Wärme wird verbraucht:

1. zur Erhitzung des Kokses auf die Endtemperatur,
2. für die Trockendestillation, die nach meinen Versuchen als wärmeverbrauchend angesehen werden muß (hierin ist einbegriffen die Wärme zur Ueberwindung der äußeren Arbeit, die bei Entstehung der Gase geleistet werden muß),
3. durch die Wärme, die mit den abziehenden Teer- und Wasserdämpfen sowie Gasen abgeführt wird.

Anfangs maß ich bei meinem elektrischen Ofen auch die Abgangstemperatur der abziehenden Gase und Dämpfe, und ich fand bei verschiedenen Versuchen unter sonst gleichen Bedingungen in dieser

Schwankungen bis zu 20 °. Bei späteren praktischen Versuchen an den Oefen der Kokerei stellte ich genau die Wärmemenge, die durch das Steigrohr abzog, fest, und ich fand, daß sie im Vergleich zu der für die Gesamtverkokung aufgewandten Wärme sehr gering war (höchstens 6 % ausmachte). Diese obigen Schwankungen in der Abgastemperatur meines elektrischen Ofens werden daher auf das Gesamtergebnis keinen merklichen Einfluß ausüben.

Versuche:

In der folgenden Tabelle bringe ich zum Beweise der bei meiner Versuchsanordnung erreichten Genauigkeit einige Zahlen über die Strahlungsverluste meines Ofens bei verschiedenen Temperaturen innerhalb 20 Minuten:

1.	72	WE	71,9	WE	72,5	WE	
2.	66,6	„	66,6	„			
3.	61,1	„	61,8	„	61	„	61 WE, 61,4 WE
4.	75	„	74	„	74	„	
5.	70,8	„	71,3	„			
6.	88	„	88,5	„	89	„	
7.	58,2	„	58,7	„			
8.	74	„	74	„			
9.	78,2	„	78,2	„			
10.	72,4	„	72,7	„	72,3	„	

Obige Zahlen zeigten an einigen Tagen große Uebereinstimmung, während an anderen Tagen Schwankungen bis zu einer Wärmeeinheit eintraten. Der Grund liegt in Ungleichmäßigkeiten des elektrischen Spannungsabfalles im Ofen, je nachdem die Kraftstation des Werkes, von der der Strom entnommen wurde, gleichmäßig oder ungleichmäßig beansprucht wurde. Ich suchte diesen Fehler durch möglichst häufiges Ablesen des Spannungsabfalles in meinem Ofen auszugleichen, und ich setzte für meine Berechnungen das Mittel dieser Ablesungen ein.

Ich stellte zuerst die Wärme fest, die benötigt wurde, um Koks in diesem auf verschiedene Temperaturen zu bringen. Ich fand, um

1 kg Koks	auf 730°	zu erhitzen	269,2	WE
	„ 820°	„ „	314	„
	„ 930°	„ „	360	„
	„ 1020°	„ „	410	„

Aus diesen Zahlen errechnet sich eine spezifische Wärme von Koks

bei 375°	von	0,377
„ 420°	„	0,39
„ 475°	„	0,394
„ 525°	„	0,4

entsprechend einer mittleren spezifischen Wärme

bei (375 mal 2)° = 750°	von	0,377
„ (420 „ 2)° = 840°	„	0,39
„ (475 „ 2)° = 950°	„	0,394
„ (525 „ 2)° = 1050°	„	0,4

Nach dem Taschenbuch für Eisenhüttenleute „Hütte“ ist die spezifische Wärme von Graphit (S. 29)

bei 0°	von	0,1604
„ 60°	„	0,199
„ 138°	„	0,2542
„ 202°	„	0,2966
„ 250°	„	0,325

Auf S. 320 wird sie dagegen tiefer angegeben:

bei 300°	von	0,325
„ 350°	„	0,345
„ 400°	„	0,358
„ 450°	„	0,369

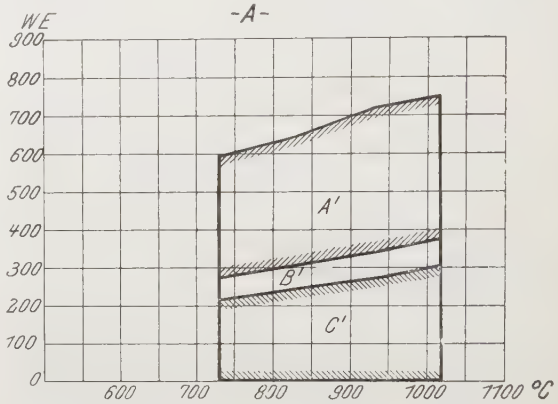
Stelle ich diese und die von mir gefundenen Werte graphisch zusammen, so zeigt sich deutlich ein Korrespondieren meiner Werte mit denen auf S. 29 in der „Hütte“ angegebenen Werten[1]).

A.

Verkokung von trockener Kohle.

65 g trockener Kohle wurden im elektrischen Ofen verkokt. Die Ergebnisse waren:

Temperatur:		730°	840°	930°	1020°
Gesamtverkokungswärme	WE	600	652	720	765
im Rückstand . . .	„	217	246	271	306
in den Gasen und Teerdämpfen	„	57	57	57	57
als Rückstand blieben	%	78	76	75	75



WE verbraucht für 1 kg trockene Kohle.
Trockene Kohle im elektr. Ofen:
A' für trockene Destillation,
B'WE in Gasen und Dämpfen,
C' im Rückstand.

Ich nahm 57 WE für Gase und Teerdämpfe an unter Zugrundelegung meiner späteren Messungen am Steigerohr eines Koksofens. Auf 1 kg nasser Kohle (12 % Feuchtigkeit) wurden danach 146 WE durch das Steigrohr fortgeführt. Rechne ich für Wasserverdampfung im Koksofen 96 WE, so bleiben 50 WE übrig. Für trockene Kohle würden das entsprechend 57 WE bedeuten.

Der 78 % betragende Rückstand des Versuches, bei 730° ausgeführt, wurde später auf 875° erhitzt, und es zeigte sich ein Rückgang von 45,2 g auf 43,6 g. Es hatten sich demnach bei der niedrigen Temperatur noch unverkokte Rückstände erhalten. Umgerechnet käme ich auf ein Koksausbringen von 75,5 %, das sich mit den anderen Ausbringen deckt. Die Annahme, mit niederer Temperatur ein höheres Koksausbringen zu erzielen, ist demnach irrig.

[1]) Weitere Angaben befinden sich: Henri le Chatelier „Vom Kohlenstoff“, Verlag W. Knapp, Halle a. Sa. 1913, S. 52; ferner in C. Schinz, Dokumente betreffend den Hochofen, Verlag von Ernst & Korn, Berlin 1868, S. 32.

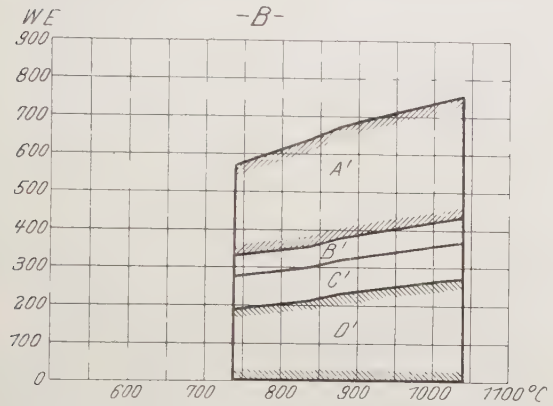
B.

Verkokung von nasser Kohle (12 % Feuchtigkeit).

65 g trockener Kohle wurden abgewogen und direkt vor dem Versuch in einer Porzellanschale mit 8,2 g Wasser vermengt.

Ich fand:

Temperaturen:		730°	840°	875°	1020°
Gesamtverkokungswärme	WE	507	640	677	760
für Wasserverdampfung	„	86	86	86	86
für Gase und Teerdämpfe	„	50	50	50	50
im Rückstand . . .	„	191	216	239	270
als Rückstand blieben (auf trockene Kohle bezogen)	%	77	75,2	74,5	75



WE verbraucht für 1 kg nasse Kohle 12 % Feuchtigkeit.
Nasse Kohle im elektr. Ofen verkokt:
A' für trockene Destillation,
B' in Gasen und Dämpfen,
C' im Wasserdampf,
D' im Rückstand.

C.

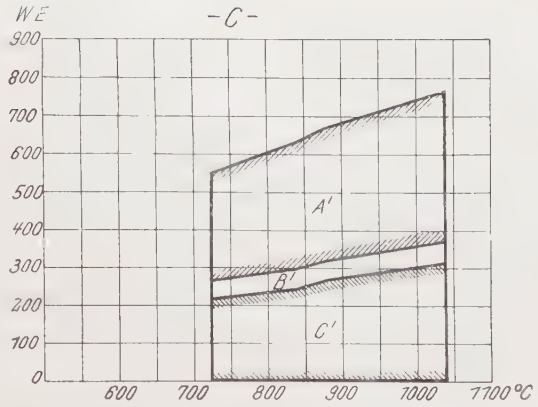
Berechne ich aus den letzten Werten die entsprechenden Werte für trockene Kohle, so erhalte ich:

Temperaturen:		730°	840°	875°	1020°
Gesamtverkokungswärme	WE	554	634	676	765
für Gase und Teerdämpfe	„	57	57	57	57
im Rückstande . .	„	215	245	273	306

Die unter A und C gefundenen Werte stelle ich in einer graphischen Darstellung D zusammen.

Mit steigender Temperatur zeigt sich ein starkes Anwachsen der für 1 kg trockener Kohle verbrauchten Gesamtwärme. Dieses ist bedingt:

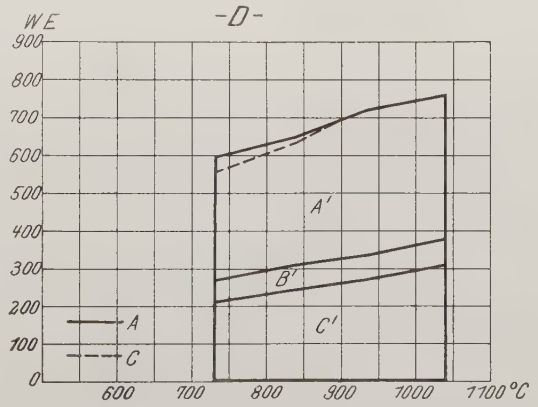
1. zum größten Teil
   a) durch höhere Erhitzung des Kokses,
   b) durch starkes Anwachsen der spezifischen Wärme des Kokses mit steigender Temperatur;
2. durch höhere Erhitzung der Gase und Teerdämpfe. (Ich lasse in meinen Tabellen diese Erhöhung unberücksichtigt, da bei dem geringen Wert der spezifischen Wärme der Gase und Dämpfe sich bei den in Betracht kommenden Temperaturschwankungen keine bei meiner Versuchsanordnung stark ins Gewicht fallende Werte ergeben würden.)



WE verbraucht für 1 kg trockene Kohle (umgerechnet).
Nasse Kohle im elektr. Ofen verkokt:
A' für trockene Destillation,
B' WE in Gasen und Dämpfen,
C' WE im Rückstand.

Ich weise noch hin auf den geringeren Verbrauch an Wärmeeinheiten für den eigentlichen Verkokungsvorgang bei nasser Kohle gegenüber trockener Kohle bei den Temperaturen von 750 bis 850° (s. graphische Darstellung D). Ich erkläre dies durch die schützende Einwirkung, die der Wasserdampf bei niederen Temperaturen auf einen Teil der Destillationsprodukte gegen die Einwirkung der Wärme auszuüben scheint.

Ich stellte weitere Versuche an zur Ermittlung der bei der Verkokung in meinem elektrischen Ofen in Gasform übergeführten Energie. Durch eine Schlauchleitung, die mit einem möglichst dicht schließenden Asbestverschluß auf mein Porzellanrohr gesetzt werden konnte, wurden die sich entwickelnden Gase in einen Gasreceiver geleitet, der mit Wasser gefüllt war. Durch Ausfließen des Wassers füllte sich derselbe allmählich mit Gas. Durch das Gewicht des ausgeflossenen Wassers wurde das Gasvolumen be-



Zusammenstellung von A und C.

stimmt. Um möglichst wenig Luft einzusaugen, war in der Leitung ein größerer Gummiball angebracht zum Ausgleichen des Drucks.

Meine Versuche brachten folgende Ergebnisse:

Versuch A. 820°.

Ich erhielt 0,213 cbm trockenes Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand auf 1 kg trockener Kohle. Die Analyse ergab folgende Zusammensetzung:

CO_2	3,2 %
C_2H_4	3,9 %
C_6H_6	1,3 %
O_2	3 %
CO	5,7 %
CH_4	34 %
H_2	30,8 %
N_2	18,1 %

Hieraus errechnet sich ein oberer Heizwert von 5372 WE. Es ständen somit 1145 WE an Gesamtgasenergie zur Verfügung. Die Verkokung benötigt 650 WE. Dies ergäbe einen Ueberschuß von 495 WE oder 43,3 %.

Versuch B. 932°.

Ich erhielt 0,239 cbm trockenes Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand auf 1 kg trockener Kohle. Die Analyse ergab folgende Zusammensetzung:

CO_2	2,6 %
C_2H_4	3,2 %
C_6H_6	1,1 %
O_2	1,2 %
CO	6,8 %
CH_4	29,2 %
H_2	44,5 %
N_2	11,4 %

Hieraus errechnet sich ein oberer Heizwert von 5200 WE. Es ständen somit 1242 WE an Gesamtgasenergie zur Verfügung. Die Verkokung benötigt 720 WE. Dies ergäbe einen Ueberschuß von 522 WE oder 42 %.

Versuch C. 1020°.

Ich erhielt 0,284 cbm trockenes Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand auf 1 kg trockener Kohle. Die Analyse ergab folgende Zusammensetzung:

CO_2	2,0 %
C_2H_4	2,78 %
C_6H_6	0,92 %
O_2	2 %
CO	5,9 %
CH_4	23,8 %
H_2	48,5 %
N_2	14,1 %

Hieraus errechnet sich ein oberer Heizwert von 4670 WE. Es ständen somit 1322 WE an Gesamtgasenergie zur Verfügung. Die Verkokung benötigt 755 WE. Dies ergäbe einen Ueberschuß von 567 WE oder 42,8 %.

Im Koksofen werden Teerdämpfe und Gas auf ihrem langen Wege durch das Deckengewölbe bis zum Steigerohr zersetzt. Beim Destillationsversuch nach Bauer suchte man diesem Umstand gerecht zu werden, daß die Gase über auf 900° erhitzte Schamottestücke geleitet werden. Bei meinem Versuche ließ ich die Gase direkt austreten in der Annahme, daß durch diese Teerdampf- und Gaszersetzung die gesamte verbrauchte Wärme keine nennenswerte Beeinflussung erhielt. Eine Vorlage von Schamottestückchen mit genauer Messung der verbrauchten Energie hätte meinen Versuch sehr kompliziert und die Genauigkeit beeinträchtigt. Ich fand bei meiner Destillation im elektrischen Ofen bei trockener Kohle

bei 932° 3,95 % Teer und
„ 1020° 3,86 % „

Der Destillationsversuch nach Dr. Bauer gibt aber 2,3 % Teer, welche Zahl sich mit der Praxis deckt. Es geht klar daraus hervor, daß sich bei der Destillation in meinem elektrischen Ofen gegenüber dem Destillationsversuch nach Dr. Bauer Gasenergie auf Teerenergie verschoben hat. Die obigen Zahlen zur Ermittlung des prozentualen Gasüberschusses können daher nicht mit dem in der Praxis zu erwartenden prozentualen Gasüberschuß übereinstimmen. Sie sagen mir nur, daß der prozentuale Gasüberschuß konstant bleibt, einerlei, ob der Ofen heiß geht oder kälter. Die im Ueberschußgas enthaltene Gesamtenergie steigt hingegen bei heißer gehendem Ofen

820°	495 WE
932°	522 „
1020°	567 „

Der heißer gehende Ofen hat außerdem noch einen größeren Gesamtkohlendurchsatz, und kann ein heißes Betreiben von Koksöfen zur Erzeugung großer Ueberschußenergien nur günstig sein.

Will ich aus meinen, mit dem elektrischen Ofen gefundenen Werten einen Schluß auf die zu erzielende Ueberschußgasenergie ziehen, so sind für die Gesamtgasenergien, die aus einem kg trockenen Kokses entstehen, die aus den Destillationsversuchen nach Dr. Bauer gefundenen Werte zugrunde zu legen, die nach vielen Erfahrungen eine gute Uebereinstimmung mit der Praxis zeigen. Der Destillationsversuch ergab 0,347 cbm trockenes Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand auf 1 kg trockener Kohle. Die Zusammensetzung siehe S. 9.

Aus der Analyse errechnet sich für 1 cbm ein oberer Heizwert von 4603 WE; im ganzen ständen dann 1600 WE zur Verfügung. Hinzu kommen die Wärmeeinheiten des absorbierten $C_6H_6 = 0{,}9$ % pro 1 kg Kohle. Dieses gäbe weitere 89 WE. Im ganzen ständen somit 1689 WE zur Verfügung. Die Frage ist nun, welche Temperatur meines elektrischen Ofens mit entsprechenden Wärmeverbrauchszahlen ist auf dieses im Destillationsversuch gefundene Ergebnis anzuwenden. Es ist schwer, oder richtiger, unmöglich, beim Destillationsversuch im Laboratorium diese Verkokungstemperatur genau zu bestimmen.

Der Destillationsversuch gibt in seinem Ergebnis die Praxis wieder, so kann ich zur Ermittlung der Temperatur beim Destillationsversuch die Praxis zugrunde legen.

Meine Versuchskohle wurde in einer Regenerativofenbatterie verkokt. Nach meinen Messungen, auf die ich später näher eingehe, fand ich, daß mir

die Praxis 1 097 000 000 WE für 700 t Kohle täglich gab, während mir mein Destillationsversuch 1 040 000 000 WE geben würde. Diese Zahlen entsprechen sich ziemlich gut, und ich kann daher die durchschnittliche in den Verkokungskammern am Ende der Garungszeit gefundene Temperatur von 870° vorerst zugrunde legen. Ob an dieser Zahl eine Korrektion vorzunehmen ist, müssen spätere Untersuchungen zeigen. Bei 870° werden bei meinen Versuchen pro kg trockener Kohle 670 WE verbraucht. Es ergibt sich hieraus eine Ueberschußgasenergie von

1689 WE
— 670 „
= 1019 WE

(Kamin- und Strahlungsverluste ausgeschlossen). In Prozenten ausgedrückt wären dies 60,4 % Ueberschußgasenergie.

1 kg nasser Kohle (12 % Feuchtigkeit) benötigt meinen Versuchen entsprechend ebenfalls 670 WE zur Verkokung. Es entstehen aber aus diesem 490 WE an Gesamtgasenergie; dies ergibt eine Ueberschußenergie von 820 WE oder 55 % (Kamin- und Strahlungsverluste ebenfalls unberücksichtigt gelassen).

Zweiter Teil.

Den besten Prüfstein für die Richtigkeit oder Nichtrichtigkeit dieser Zahlen bietet die Praxis. Im folgenden stelle ich die Wärmebilanzen von Koksofenbatterien auf, die die obige Kohle verarbeiten:

Die Kohle wurde in einer Doppel-Abhitze-Batterie und in einer Doppel-Regenerativ-Koksofenbatterie verkokt. Ich machte meine Aufstellung an einer Abhitzebatterie und zwei Regenerativbatterien. Da die drei Batterien hinsichtlich der durchschnittlichen Temperatur ihrer Ofenkammern verschiedene Werte ergaben, so stand mir zugleich ein Weg offen, das Verhalten derselben Kohle in bezug auf Wärmeverbrauch bei verschiedenen Temperaturen in der Praxis ebenfalls zu prüfen.

A. Abhitzebatterie.

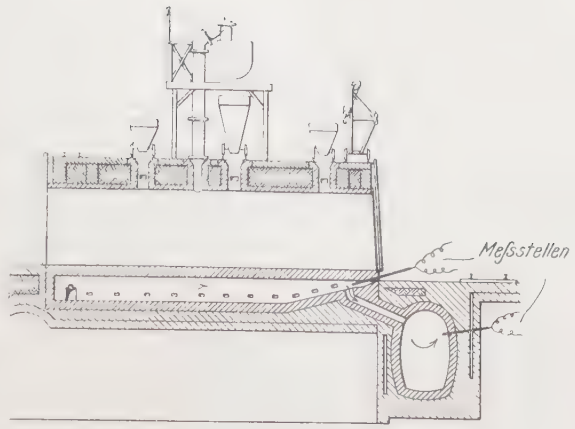
Die Batterie bestand aus 70 Abhitzeöfen, gebaut Ende des Jahres 1906. Die Oefen hatten vierteilige Wandbeheizung und die Abhitze wurde von einem großen Abhitzekanal, der längs einer jeden Batterie hinlief, aufgenommen, um zu den Kesseln und von da in den Kamin geführt zu werden.

Bei meinen Messungen kam es mir darauf an,

erstens genau die Wärme zu bestimmen, die auf 1 cbm Gas von der Abhitze abgeführt wurde.

Diese Wärme, abgezogen von der aus 1 cbm Gas entstehenden Wärme, gibt mir die im Ofen verbliebene.

Da die Oefen in der Mitte der Batterie, wie Ofen 35, kälter gingen, während die Kopföfen heißer gingen, wählte ich, um einen guten Durchschnitt zu erhalten, die Oefen 35 bis 70. Ich nahm Messungen vor in den



Abhitzeofen.

Füchsen zweier Oefen und zugleich im Abhitzekanal, wo sich die Abhitze der Oefen 35 bis 70 vereinigt hatte - dies war bei Ofen 35 der Fall —. An diesen drei Stellen brachte ich Thermoelemente an und zu gleicher Zeit wurden an diesen Stellen die verbrannten Gase zum späteren Analysieren in Flaschen abgezogen.

Unter den Oefen befand sich ein mit Wasser gefüllter Gasreceiver, der über die Dauer des Versuchs langsam leer lief und so gleichmäßig Gas für spätere Analysen und zur spezifischen Gewichtsbestimmung abzog.

zweitens genau die den Heizwänden zugeführte Gasmenge zu bestimmen.

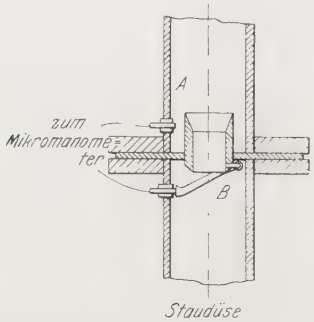
In der Abhandlung „Die Fortschritte des Beleuchtungswesens und der Gasindustrie im Jahre 1910“ von Professor Dr. H. Stracher fand ich verschiedene Arten von Meßinstrumenten angegeben: Stauscheiben, Staudoppelrohr, Rotameter und elektrische Gasmessung nach Thomas. Die „Hütte“ gibt neben dem Staudoppelrohr noch die Staudüse an. Es kam mir darauf an, möglichst die durchschnittliche Gasmenge, die von den Oefen 35 bis 70 verbraucht wurde, zu bestimmen. Zu diesem Zweck mußte ich bei verschiedenen Heizwänden den Heizgasverbrauch feststellen und dann das Mittel ziehen. Wegen seiner genauen Meßergebnisse baute ich ein Rotameter ein. Es zeigte sich aber, nach Einbau des Instrumentes, ein Sinken des Druckes in der Düsenleitung. Da es bei einer Doppelbatterie von 40 Oefen unmöglich ist, die Gasleitungen zu den anderen Heizwänden auch entsprechend zu drosseln, ohne dabei andere Betriebsbedingungen zu erhalten, so mußte ich meine Messungen mit Rotameter verwerfen und mich nach einer Methode umsehen, durch die keine Drosselung in der Gasleitung erfolgte. Messungen mit einem Staudoppelrohr konnten in einem verschmutzten gußeisernen Rohr von 50 mm Durchmesser nicht einwandfrei ausfallen. Ich legte daher den Messungen folgende Ueberlegung zugrunde:

Die aus den Düsen der Verteilungsleitung austretende Gasmenge ist proportional dem Quadrat aus

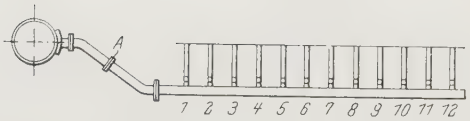
Gasdruck durch spezifisches Gewicht des Gases in der Verteilungsleitung für jede Heizwand.

Baue ich in die Rohrleitung bei A. (s. Skizze) irgendwie eine Vorrichtung zum Messen des Gasvolumens ein, und bestimme zu gleicher Zeit den statischen Druck in der Gasverteilungsleitung, so habe ich damit die betreffende Verteilungsleitung gleichsam geeicht. Ich kann nun aus der Leitung bei A. den Gasmesser wieder ausbauen und erhalte so wieder die normalen ursprünglichen Betriebsverhältnisse unter Beseitigung des Widerstandes des Gasmessers (Rotameter, Staudüse).

Ich wählte für die Gasmessungen eine Staudüse; ihre Gestaltung ist aus nebenstehender Skizze ersichtlich. Bei dieser Konstruktion glaubte ich unbedingt sicher den Gesamtgeschwindigkeitsdruck gegenüber dem an dieser Stelle sich befindenden statischen Druck zu erhalten. Bei Anbringung einer einfachen Stauscheibe in Röhren mit einem derartig



Staudüse



A Einbaustelle der Staudüse

kleinen Querschnitt wäre es leicht möglich, daß ich durch Wirbelungen in dem Raum A nicht den Gesamtgeschwindigkeitsdruck bekommen und in dem Raum B keinen statischen Druck, sondern durch Wirbelungen teilweise Saugung. Messe ich nach Anordnung meiner Staudüse, so muß sich in dem toten Raum A das Gas vollständig stauen und ich bekomme dann gegenüber der Stelle B in der Düse, in der unmöglich eine saugende Wirkung auftreten kann, eine Umsetzung der gesamten Geschwindigkeit des Gases in Staudruck.

Während meiner Gasmessungen mit der Staudüse beobachtete ich den statischen Druck in der Gasverteilungsleitung der Heizwand gegenüber dem äußeren Luftdruck. Nach Ausbau der Düse wird an derselben Stelle wiederum der statische Druck abgelesen. Die der Heizwand zuströmende Gasmenge berechnet sich nach folgender Formel:

$$V = V_1 \sqrt{\frac{d_1 \cdot s}{d \cdot s_1}}$$

V_1 = die von der Staudüse gemessene Gasmenge.
d = Gasdruck in der Verteilungsgasleitung während der Gasmessungen.
s = durchschnittliches spezifisches Gewicht während der Gasmessungen.
d_1 = Gasdruck nach Ausbau des Meßapparates bei normalen Betriebsverhältnissen.
s_1 = spezifisches Gewicht des Gases bei Messung des Gasdruckes.

Folgender Versuch soll zeigen, daß es praktisch gleichgültig ist, welche Stelle ich in dem Gasverteilungsrohr für die Messung des statischen Druckes aussuchte.

Zu gleicher Zeit fand ich mit dem Mikromanometer

bei Düse 1 = 68,7 mm
„ „ 6 = 59,9 „
„ „ 12 = 61,4 „

Nach Einbau der Staudüse fand ich bei dem Staudruck von 6,885 cm WS

bei Düse 1 . . . . 30,29 mm WS
„ „ 6 . . . . 27,95 „ „
„ „ 12 . . . . 27,47 „ „

Danach würde bei Düse 1 die Rektifikationszahl 1,51 sein, bei Düse 6 = 1,465, und bei Düse 12 = 1,5. Das Mittel hiervon wäre 1,48.

Nehme ich, wie es bei meinen Versuchen geschehen soll, die statischen Messungen im Verteilungsrohr gegenüber Düse 1 vor, so wäre die sich ergebende Gasmenge mit 0,98 zu multiplizieren, um den durchschnittlichen Druckverhältnissen der Verteilungsleitung der Wand gerecht zu werden. Dieser Korrektionsfaktor ist aber so gering, daß er unberücksichtigt gelassen werden darf.

Ich baute nun in die Gasleitung der Heizwände 40/41, 41/42, 54/55 und 55/56 meine Staudüse ein, bestimmte den Geschwindigkeitsdruck, um das durchgehende Gasvolumen zu erfahren, las zugleich bei Düse 1 derselben Leitung den statischen Druck ab. Ferner wurde über die Zeit des Versuchs Gas in den Gasreceiver abgesogen und das spezifische Gewicht desselben später mit dem Schilling-Apparat bestimmt. Die Gastemperatur betrug 70°.

Gasleitung Heizwand 40/41.

Stauüberdruck der Staudüse	Statischer Druck bei Düse 1
64,8 mm	29,49 mm

Gasleitung Heizwand 41/42.

64,71 mm	27,325 mm

Gasleitung Heizwand 54/55.

71,3 mm	29,3 mm

Gasleitung Heizwand 55/56

62,7 mm	25,8 mm

Aus der Formel $v = \sqrt{2_g \frac{h}{s}}$ berechnet sich die Gasgeschwindigkeit, diese multipliziert mit dem Düsenquerschnitt gibt das Gasvolumen. Ich erhalte danach für:

Gasleitung Heizwand 40/41

49 cbm Gas bei 0° und 760 mm pro Stunde bei 29,49 mm statischem Druck bei Düse 1 und einem spezifischen Gewicht des Gases gegen Wasser von 0,000 495 bei 0° und 760 mm.

Gasleitung Heizwand 41/42

49,2 cbm Gas bei 0° und 760 mm pro Stunde bei 27,325 mm statischem Druck bei Düse 1 und einem spezifischen Gewicht des Gases gegen Wasser von 0,000 494 bei 0° und 760 mm.

Gasleitung Heizwand 54/55

52,1 cbm Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand pro Stunde bei 29,3 mm statischem Druck bei Düse 1 und einem spezifischen Gewicht des Gases gegen Wasser von 0,000 487 bei 0° und 760 mm Barometerstand.

Gasleitung Heizwand 55/56.

47,5 cbm Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand pro Stunde bei einem statischen Druck von 25,6 mm bei Düse 1 und einem spezifischen Gewicht des Gases gegen Wasser von 0,000 527 bei 0° und 760 mm Barometerstand.

Nach diesen Vorbereitungen schreite ich zu den Messungen an den Heizwänden 40/41, 41/42 und in dem Abhitzekanal. Die Abhitze von Heizwand 40/41 strömt in den Sohlkanal unter Ofen 40, die von Heizwand 41/42 in den Sohlkanal unter Ofen 41.

Folgende Tabelle gibt die Zeiten, zu welchen die Oefen während der Messungen wieder gedrückt und wieder gefüllt wurden, an:

Ofen:	40	41	42
		23. Januar	
	9^{23} abends	10^{0} morgens	—
		24. Januar	
	2^{25} nachts	4^{0} nachts	2^{40} nachts
		25. Januar	
	—	11^{0} morgens	—

Dann baute ich mein Thermoelement in die Füchse der Heizwand 41/42 und in den Abhitzekanal gegenüber dem Ofen 35 ein, las alle Stunden die Temperatur ab, nahm Dauerproben der Abgase bei obigen drei Stellen, ferner eine Dauerprobe des Heizgases unter den Oefen, und schloß an die Gasleitung der Heizwände 40/41 und 41/42 bei Düse 1 zwei Mikromanometer an zur Ablesung des statischen Druckes. Schließlich wurde noch die Stärke des Kaminzuges im Abhitzekanal an einem vorhandenen Manometer abgelesen. Die Ergebnisse der Ablesungen sind in folgender Tabelle zusammengestellt:

23. Januar.

Zeit	Ofen 40/41	Ofen 41/42	Abhitzekanal	Gasdruck 40/41 cm	Gasdruck 41/42 cm	Zug mm
11 Uhr	1097	1012	1062	14,05	15,05	11
11 „	1089	1020	1053	13,5	14,45	11
1 „	1088	1023	1056	14,15	15,1	10,5
2 „	1090	1018	1050	14,15	15,05	10
3 „	1085	1011	1056	14	14,9	10,5
4 „	1088	1012	1046	13	13,9	10
5 „	1089	1014	1050	11,9	13,05	9,5
6 „	1079	1007	1041	13,4	14,75	9
7 „	1075	1030	1036	12,4	12,45	9,5
8 „	1072	1011	1043	13,4	13,4	9
9 „	1074	1005	1042	13,25	13,25	9,5
10 „	1071	1005	1062	14,1	14,05	9,5
11 „	1080	1001	1060	14,15	14,15	9,5
12 „	1072	997	1041	15,15	15,15	9,5
1 „	1069	1006	1038	16,15	16	9,5
2 „	1075	1006	1051	17	17	10
3 „	1076	1004	1058	17,3	17	9,5
			durchschnittlich			
	1076	1007	1046	15,07	15,66	cm
CO_2 %	9,6	8,2	9,4			
O_2 .%	0,3	1,5	0,7			

Das Mikromanometer hatte eine Neigung von 40° und war mit Alkohol vom spezifischen Gewicht von 0,81 gefüllt.

Nachstehend die Analyse des während der Messung den Wänden zugeführten Heizgases. Die volumetrische Zusammensetzung der Rauchgase berechnet sich hiernach wie folgt:

	1 cbm Gas %	CO_2	Wasserdampf	erford. O_2	Oberer Heizwert	
CO_2 . .	1,9	0,019	—	—	—	
C_2H_4 . .	1,6	0,032	0,032	0,048	238,448	
C_6H_6 . .	0,3	0,018	0,009	0,0235	103,269	
O_2 . . .	1,6	—	—	—	—	
CO . .	6	0,06	—	0,03	182,04	
CH_4 . .	26,1	0,261	0,522	0,522	2486,547	
H_2 . . .	49,7	—	0,497	0,2485	1516,844	
N_2 . . .	12,8	—	—	—	—	
		0,390	1,060	0,8710	4527,148	WE
			—	0,016		
				0,8550		

Vorstehende Analyse wurde nach Hempel ausgeführt. Zur Kontrolle machte ich weitere Bestimmungen über die gesamte bei der Verbrennung entstehende Kohlensäure. CO_2 und O_2 wurden in dem Gas absorbiert und so bestimmt. Ich fügte dann das nötige Luftvolumen zu, ließ die Mischung explodieren und bestimmte nun in den verbrannten Gasen die entstandene Kohlensäure. Es ergaben sich so 0,397 cbm CO_2 aus einem cbm Gas, und ich legte, da diese Zahlen direkt gefunden wurden und mögliche Fehler hier geringer sein möchten, sie meinen späteren Berechnungen zugrunde.

Heizwand 40/41.

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2 . . . . . = 0,397 cbm
N_2 . . . . . = 3,217 „
trockenes Rauchgas . . . . = 3,614 „

Die Analysen der Rauchgase der Heizwand 40/41 ergaben 9,2 % CO_2 und 0,3 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1076°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}614 + x}{x} = \frac{100}{0{,}3 \cdot 5}$$

$x = 0{,}055$ cbm Luft.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,397 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung	1,060	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,0814	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,0011	
zweitens an Wasserdampf	zusammen	= 1,1625 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff		= 3,272 „

Als Werte für die spezifische Wärme der Gase und Dämpfe nehme ich die von Le Chatelier ermittelten. Da ich mit denselben recht annehmbare Zahlen fand, sah ich mich auch nicht veranlaßt, anderen, neueren Forschern den Vorzug zu geben. Ich ermittelte so die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1076° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° und fand

für CO_2	= 0,559
für Wasserdampf	= 0,5015
für permanente Gase	= 0,3336

Die durch den Fuchs auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2	= 0,397	. 0,559	. 1066 =	235,5 WE
Wasserdampf	= 1,1625	. 0,5015	. 1066 =	621,0 „
permanente Gase	= 3,272	. 0,336	. 1066 =	1172,0 „
			zusammen =	2028,5 WE

Da 1 cbm Gas 4527 WE zuführt, so verblieben im Ofen 2499 WE = 55,3 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Heizwand 41/42.

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2	= 0,397 cbm
N_2	= 3,217 „
trockenes Rauchgas	= 3,614 „

Die Analysen der Rauchgase der Heizwand 41/42 ergaben 8,2 % CO_2 und 1,5 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1007°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}614 + x}{x} = \frac{100}{1{,}5 \cdot 5}$$

$x = 0{,}2775$ cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,397 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung	1,060	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,0824	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,00555	
zweitens an Wasserdampf		= 1,16795 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff		= 3,4945 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1007° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° betrug

für CO_2	= 0,548
für Wasserdampf	= 0,4925
für permanente Gase	= 0,339

Die durch den Fuchs auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2	= 0,397	. 0,548	. 997 =	217,0 WE
Wasserdampf	= 1,1679	. 0,4925	. 997 =	572,5 „
permanente Gase	= 3,4945	. 0,339	. 997 =	1180,0 „
			zusammen	1969,5 WE

Da 1 cbm Gas 4527 WE zuführt, so verblieben im Ofen 2557 WE = 56,5 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Abhitzekanal (23. Januar).

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2	= 0,397 cbm
N_2	= 3,217 cbm
trockenes Rauchgas	= 3,614 cbm

Die Analysen der Rauchgase des Abhitzekanals ergaben 9,4 % CO_2 und 0,7 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1046°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}614 + x}{x} = \frac{100}{0{,}7 \cdot 5}$$

$x = 0{,}1243$ cbm

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,397 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung	1,060	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,0824	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,00249	
zweitens an Wasserdampf		= 1,16489 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff		= 3,3413

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1046° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° betrug

für CO_2	= 0,554
„ Wasserdampf	= 0,4972
„ permanente Gase	= 0,2329

Die durch den Fuchs auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2	= 0,397	. 0,554	. 1036 =	228,0 WE
Wasserdampf	= 1,16489	. 0,4974	. 1036 =	600,0 „
permanente Gase	= 3,3413	. 0,3329	. 1036 =	1155,0 „
			zusammen	1983,0 WE

Da 1 cbm Gas 4527 WE zuführt, so verblieben im Ofen durchschnittlich 2544 WE = 56,3 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Gasmessungen.

Bei der Heizwand 40/41 betrug in der Gasleitung bei Düse 1 der durchschnittliche statische Druck 75,8 mm WS, das spezifische Gewicht des Gases bei

0° und 760 mm Barometerstand betrug 0,000 528, auf Wasser bezogen. Die verbrauchte Gasmenge ist dann

$$v = 39 \cdot \sqrt{\frac{75{,}8 \cdot 0{,}000495}{29{,}49 \cdot 0{,}000528}}$$

v = 75 cbm Gas von 0° und 760 mm Barometerstand.

Im Ofen wurden durchschnittlich stündlich 275 kg nasser Kohle verkokt. Wenn somit 2498,6 . 76 WE stündlich dem Ofen zugeführt wurden, so verbraucht das kg nasser Kohle = 690 WE.

Bei der Heizwand 41/42 betrug in der Gasleitung bei Düse 1 der durchschnittliche statische Druck 78,9 mm WS, das spezifische Gewicht des Gases bei 0° und 760 mm Barometerstand 0,000 528, auf Wasser bezogen. Die verbrauchte Gasmenge ist dann

$$v = 49{,}2 \cdot \sqrt{\frac{78{,}9 \cdot 0{,}000494}{27{,}325 \cdot 0{,}000528}}$$

v = 80,7 cbm Gas von 0° und 760 mm Barometerstand.

Im Ofen wurden durchschnittlich stündlich 275 kg nasser Kohle verkokt. Wenn somit 2557,6 . 80,6 WE stündlich dem Ofen zugeführt wurden, so verbrauchte das kg nasser Kohle = 749 WE.

Für meine Messungen im Abhitzekanal lege ich den Durchschnitt meiner schon ausgeführten Messungen von Heizwand 40/41 und 41/42 und meiner im folgenden Berücksichtigung findenden Messungen von Heizwand 54/55 und 55/56 zugrunde. Ich finde so einen Gasverbrauch von 82 cbm pro Heizwand und Stunde, der mir annähernd den durchschnittlichen Verbrauch der Oefen 35 bis 70 anzeigt. Bei einem Kohlendurchsatz von 275 kg nasser Kohle stündlich pro Ofen und einer stündlich dem Ofen zugeführten Wärmemenge von 2544,0 . 82,3 WE finde ich dann für das kg nasser Kohle einen Wärmeverbrauch von 762 WE.

Für meine weiteren Messungen wählte ich die Heizwände 54/55 und 55/56. Die Zeiten des Füllens und Drückens gibt folgende Tabelle an:

Ofen:	54	55	56
		6. Februar 1913	
	10^{54} abends	—	—
		7. Februar 1913	
	—	4^{15} vorm.	7^{10} vorm.
		8. Februar 1913	
	4^{30} vorm.	10^{30} vorm.	2^{25} nachm.

Die volumetrische Zusammensetzung des Gases berechnet sich nach folgender Tabelle:

	1 cbm Gas %	CO_2	H_2O	O_2	Oberer Heizwert
CO_2 . .	2,2	0,022	—	—	—
C_2H_4 . .	1,1	0,022	0,022	0,033	163,933
C_6H_6 . .	0,3	0,018	0,009	0,0225	103,269
O_2 . . .	0,8	—	—	—	—
CO . .	5,9	0,059	—	0,229	179,006
CH_4 . .	26	0,26	0,52	0,52	2477,02
H_2 . . .	50,6	—	0,506	0,253	1344,312
N_2 . . .	13,1	—	—	—	—
		0,381	1,057	0,8575	4467,540 WE
			— 0,008		
			= 0,8495		

Die Ergebnisse meiner Messungen am 7. Februar 1913 waren:

Zeit	Ofen 54/55	Ofen 55/56	Abhitzekanal	Gasdruck 54/55	Gasdruck 55/56	Zug
				mm	mm	mm
11 Uhr	1017	1062	1092	—	—	11
12 „	1012	1052	1091	15	15,6	11
1 „	1010	1057	1078	15,45	15,95	10,5
2 „	1003	1048	1076	16,5	17,0	10,5
3 „	998	1044	1073	16,65	17,1	11,5
4 „	1000	1043	1074	15,1	15,5	12
5 „	998	1040	1074	16,6	17,05	11,5
6 „	1001	1042	1074	15,5	15,85	11,5
7 „	1006	1043	1082	14,55	14,95	10,5
8 „	1008	1042	1081	18,1	18,55	12
9 „	1015	1047	1088	17,45	16,8	12
10 „	1030	1051	1091	16,9	16,55	12
11 „	1037	1056	1094	16,1	16,6	11,5
12 „	1038	1051	1094	15,05	15,4	11,5
1 „	1038	1054	1095	16,5	16,85	12
2 „	1039	1061	1095	17,45	17,9	12
3 „	1038	1060	1095	17,7	18,1	12
4 „	—	1067	1095	17,6	18	11,5
5 „	1040	1064	1093	16,95	17,3	11,5
6 „	1037	1066	1094	17,55	17,9	11,5
7 „	1037	1068	1090	18	18,4	12
8 „	1034	1068	1090	18	18,4	12
9 „	1049	1077	1092	15	15,45	11
10 „	1038	—	1091	15,5	15,9	11
11 „	1018	1071	1091	15,1	15,55	10,5
12 „	1012	1070	1090	15,45	—	11
1 „	1005	1073	1088	15,2	15,85	10
2 „	1004	1068	1083	18,75	15,6	11
3 „	998	1061	1075	—	19,1	9,5
4 „	—	—	1076	—	—	10
			durchschnittlich			
	1020	1056	1086	16,4	16,7	
CO_2 %	8,8	9	9,4			
O_2 %	0,5	0,2	0,2			

Das Mikromanometer hat eine Neigung von 40° und ist mit Alkohol vom spezifischen Gewicht von 0,81 gefüllt. Eine Kontrollanalyse über den aus dem Gase bei seiner Verbrennung sich ergebenden CO_2-Gehalt ergab 0,379 cbm pro 1 cbm Gas, im Gegensatz zu 0,381 cbm errechnet aus den obigen Analysenergebnissen. Ich nehme 0,38 cbm für meine folgenden Berechnungen an.

Heizwand 54/55.

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2	= 0,38 cbm
N_2	= 3,195 „
trockenes Rauchgas	= 3,575 cbm

Die Analysen der Rauchgase der Heizwand 54/55 ergaben 8,8 % CO_2 und 0,5 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1020°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}575 + x}{x} = \frac{100}{0{,}5 \cdot 5}$$

$$x = 0{,}084$$

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2 . . . . . = 0,38 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung 1,057
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18° 0,02
an Wasserdampf in der Verbrenyungsluft 0,081
an Wasserdampf in der Ueberschußluft 0,00168

zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,15968 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff . = 3,279 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1020° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° betrug

für CO_2 . . . . . = 0,55
„ Wasserdampf . . . . . = 0,494
„ permanente Gase . . . . . = 0,3322

Die durch den Fuchs auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,38 . 0,55 . 1010 = 211,0 WE
Wasserdampf . . = 1,1597 . 0,494 . 1010 = 579,0 „
permanente Gase. = 3,279 . 0,3322 . 1010 = 1100,0 „

zusammen 1890,0 WE

Da 1 cbm Gas 4467 WE zuführt, so verblieben im Ofen 2577 WE = 57,6 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Heizwand 55/56.

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2 . . . . . = 0,38 cbm
N_2 . . . . . = 3,195 „
trockene Rauchgase . . . . . = 3,575 „

Die Analysen der Rauchgase der Heizwand 55/56 ergaben 9 % CO_2 und 0,2 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1058°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}572 + x}{x} = \frac{100}{0{,}2 \cdot 5}$$

$x = 0{,}0336$ cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2 . . . . . = 0,38 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung 1,057
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18° 0,020
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft 0,081
an Wasserdampf in der Ueberschußluft 0,00168

zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,15968 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff = 3,228 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1058° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° betrug

für CO_2 . . . . . = 0,556
„ Wasserdampf . . . . . = 0,498
„ permanente Gase . . . . . = 0,333

Die durch den Fuchs auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,38 . 0,556 . 1048 = 221,5 WE
Wasserdampf . = 1,15968 . 0,498 . 1048 = 606,0 „
permanente Gase = 3,228 . 0,3333 . 1048 = 1127,0 „

zusammen = 1954,5 WE

Da 1 cbm Gas 4467 WE zuführt, so verblieben im Ofen 2513 WE = 56,3 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Abhitzekanal (7. Februar).

Auf Grund meiner Messungen gibt mir 1 cbm Gas bei vollkommener Verbrennung an

CO_2 . . . . . = 0,38 cbm
N_2 . . . . . = 3,195 „
trockenes Rauchgas . . . . . = 3,575 cbm

Die Analysen der Rauchgase des Abhitzekanals ergaben 9,4 % CO_2 und 0,2 % O_2. Die durchschnittliche Temperatur im Fuchs betrug 1085°. Den sich aus dieser Analyse ergebenden Luftüberschuß finde ich nach folgender Gleichung:

$$\frac{3{,}575 + x}{x} = \frac{100}{0{,}2 \cdot 5}$$

$x = 0{,}0336$ cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2 . . . . . = 0,38 cbm
zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,15968 „
drittens an Stickstoff und Sauerstoff . = 3,228 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 1085° bei einer Außentemperatur der Luft von 10° betrug

für CO_2 . . . . . = 0,56
„ Wasserdampf . . . . . = 0,502
„ für permanente Gase . . . . . = 3,339

Die durch den Abhitzekanal auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich hiernach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,38 . 0,56 . 1075 = 229,0 WE
Wasserdampf . . = 1,1597 . 0,502 . 1075 = 624,0 „
permanente Gase = 3,228 . 0,3339 . 1075 = 1160,0 „

zusammen = 2013,0 WE

Da 1 cbm Gas 4467 WE zuführt, so verblieben in einem Ofen durchschnittlich — für die Oefen 35 bis 70 gerechnet — 2454 WE = 55 %, die für die Verkokung abgegeben wurden.

Gasmessungen.

Bei der Heizwand 54/55 betrug in der Gasleitung bei Düse 1 der durchschnittliche statische Druck 82,4 mm WS, das spezifische Gewicht des Gases bei 0° und 760 mm Barometerstand betrug 0,00051, auf Wasser bezogen. Die verbrauchte Gasmenge ist dann

$$v = 52{,}1 \cdot \sqrt{\frac{82{,}4 \cdot 0{,}000487}{29{,}3 \cdot 0{,}00051}}$$

v = 85,4 Gas von 0° und 760 mm Barometerstand.

Im Ofen wurden durchschnittlich stündlich 275 kg nasser Kohle verkokt. Wenn somit 2577,0 . 85,4 WE stündlich dem Ofen zugeführt werden, so verbraucht das kg nasser Kohle = 800 WE.

Bei der Heizwand 55/56 betrug in der Gasleitung bei Düse 1 der durchschnittliche statische Druck 84,2 mm WS, das spezifische Gewicht des Gases bei 0° und 760 mm Barometerstand 0,00051, auf Wasser bezogen. Die verbrauchte Gasmenge ist dann:

$$v = 47{,}5 \cdot \sqrt{\frac{84{,}2 \cdot 0{,}000527}{25{,}6 \cdot 0{,}00051}}$$

v = 87,5 cbm Gas bei 0° und 760 mm Barometerstand.

Im Ofen wurden durchschnittlich 275 kg nasser Kohle verkokt pro Stunde. Wenn somit 2513,0 . 87,4 WE stündlich dem Ofen zugeführt wurden, so verbrauchte das kg nasser Kohle = 800 WE.

Meinen Messungen im Abhitzekanal lege ich den Durchschnitt meiner Gasmessungen für die Heizwände zugrunde. Ich finde so, wie schon auf S. 17 erwähnt, einen Gasverbrauch von 82,3 cbm pro Heizwand und Stunde. Es errechnet sich hiernach für das kg nasser Kohle ein Wärmeverbrauch von

$$\frac{2454 \cdot 82{,}3}{275} = 734 \text{ WE.}$$

Für die Bestimmung der für das kg Kohle verbrauchten Wärme halte ich es nicht für ganz einwandfrei, den Gesamtkohlendurchsatz der Batterie auf die einzelnen Oefen zu übertragen, da dieser leicht schwanken wird. Die von mir aufgestellten Berechnungen unter Zugrundelegung der Messungen am einzelnen Ofen können daher für Aufstellung der für das kg Kohle verbrauchten Gesamtwärme nur als rohe Zahlen betrachtet werden. Bei meinen Messungen in den Füchsen legte ich mehr Wert auf die Festlegung des prozentualen Wirkungsgrades. Dieser zeigt denn auch in den Werten

Heizwand 40/41	= 55,25 %
„ 41/42	= 56,5 %
„ 54/55	= 57,6 %
„ 55/56	= 56,3 %
Abhitzekanal am 23. 1. 13	= 56,25 %
Abhitzekanal am 7. 2. 13	= 55,0 %

in sich und mit den Werten des Abhitzekanals recht gutes Uebereinstimmen.

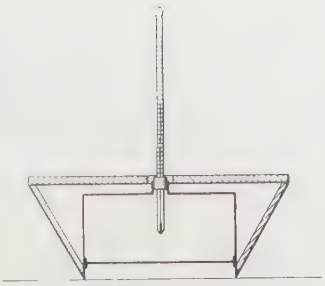
Die in dem Abhitzekanal gefundenen Werte zeigen prozentual kein höheres Ergebnis als die in den Füchsen der Heizwand gefundenen. Ich kann daher Messungen des Abhitzekanals der Ermittlung der auf 1 kg Kohle verbrauchten Wärme ruhig zugrunde legen, damit hinlänglich bewiesen ist, daß der Wärmeverlust im Abhitzekanal belanglos ist und sich sogar mit den mir zu Gebote stehenden Meßmethoden nicht konstatieren läßt. Lege ich die Messungen im Abhitzekanal zugrunde, so bringen mir diese einen Durchschnitt über 35 Oefen, und kann hieraus skrupellos auch der entsprechende Betrag des Gesamtkohlendurchsatzes angenommen werden.

Am 23. Januar 1913 fand ich aus den Messungen im Abhitzekanal 762 WE, die für ein kg nasser Kohle verbraucht wurden,

am 7. Februar 1913 fand ich hingegen 734 WE. Ich nehme das Mittel dieser beiden Werte = rund 750 WE, die also in meiner Abhitzebatterie durchschnittlich auf 1 kg nasser Kohle zu rechnen wären.

Hierin sind noch einbegriffen die durch Strahlung verloren gegangenen Wärmeeinheiten. Bevor ich daher einen Vergleich mit meinen im elektrischen Ofen gefundenen Zahlen vornehme, muß ich diese verloren gehende Strahlungsenergie zu ermitteln suchen.

Ich beschloß, direkt die Strahlungswärme mit einem Kalorimeter zu ermitteln. Zum Vorbild diente mir hier das von D. Barnum benutzte Kalorimeter. Der Hauptvorzug des Kalorimeters ist, daß an der Aufsatzstelle nicht die Steinschichten des Ofens abgekühlt werden, wodurch man zu hohe Werte finden würde, sondern daß Luft als Wärmeüberträger wirkt. Um Wärmezufuhr von den Seiten möglichst auszuschließen, hatte ich das Gefäß mit einem konischen Blechmantel, der mit einer Asbestschicht versehen war, umgeben. Zur besseren Erläuterung vorstehende Skizze.



Kalorimeter zum Messen des Strahlungsverlustes.

Da mir keine vollständige Isolierung gelang, wurde in einem besonderen Versuch die Wärmeaufnahme durch diese Isolierschicht bestimmt. Bei dem Gefäß wurde in einer Höhe von 20 cm über dem Ofen die Bodenfläche gut mit Asbest isoliert und dann die Wärmeaufnahme des Kalorimeters bestimmt. Den gefundenen Wert zog ich dann jedesmal von den als Strahlung ermittelten Werten ab. Ich fand folgende Resultate:

Wärme, ausgestrahlt pro qm und Stunde

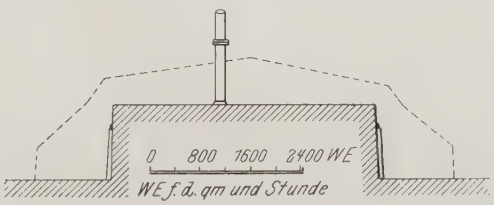
Strahlung der Ofendecke:

1 m vom Rande Koksseite	= 474 Kal.
1 m von den Steigerohren nach der Maschinenseite	= 732 „
1 m vom Rande Maschinenseite . . .	= 424 „

Strahlung der Ofentüren:

1½ Stunden nach Füllen des Ofens .	= 1110 Kal.
27 „ „ „ „ „ . .	= 1600 „
5½ „ „ „ „ „ . .	= 700 „

Nachstehende Zeichnung gibt die Verteilung der Strahlung über den Ofen an. Hieraus errechnet sich für die Deckenfläche und für den oberhalb der Tür



Verteilung der Strahlung über den Ofen.

liegenden Teil eine durchschnittliche Strahlung auf das qm pro Stunde von 543 WE. Auf die 12 qm Fläche machte das dann 6516 WE. Für Strahlung der Türen gehen durchschnittlich 1133 WE verloren. Für 4 qm macht das dann 4532 WE. Im ganzen ergibt dies 11 048 WE, die stündlich verloren gehen. Bei einem stündlichen Kohlendurchsatz von 275 kg gehen mir demnach rd. 40 WE auf das kg für Strahlung verloren. Bei dem ermittelten Gesamtwärmeverbrauch von 750 WE wären das 5,3 %.

Diese Zahl findet ihre Bestätigung in folgender Ueberlegung:

Ich ziehe bei der Heizwand das Verhältnis der großen nutzbringenden Flächen gegenüber den Strahlungsflächen nach den beiden Kopfenden und nach der Decke; die Strahlung nach unten wird durch Vorwärmung der Luft wieder nutzbringend verwertet.

Länge der Heizwand	1	m
äußere Weite der Heizwand	0,05	„
Höhe der Heizwand	2	„
nutzbringende Flächen	50	qm
die Kopfflächen	2	„
die Deckenfläche	5	„

Da über letzterer sich eine 0,8 m starke Isolierschicht befindet, ist für diese Fläche $\frac{5 \cdot 0{,}1}{0{,}8} = 0{,}62$ zu setzen.

Dies ergibt an nutzbarer Fläche 50 qm, an Strahlungsfläche 2,62 qm. Hiernach würden 5,25 % an Strahlung verloren gehen, welcher Wert den oben gefundenen von 5,3 % bestätigt.

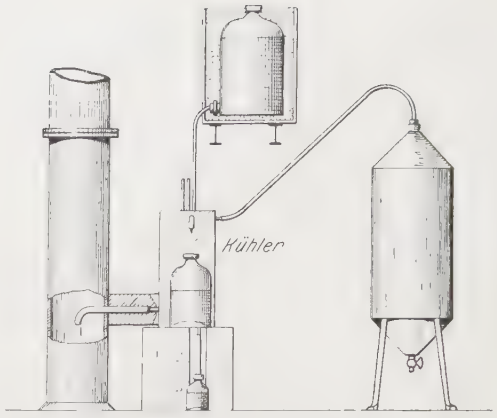
Subtrahiere ich diese 40 WE von den insgesamt verbrauchten 750 WE, so verbleiben mir 710 WE, die für den Verkokungsprozeß analog den Versuchen im elektrischen Ofen aufgewandt werden.

Es kommt mir nun darauf an, die Durchschnittstemperatur im Innern der Ofenkammer am Ende der Garungszeit über die 35 Oefen möglichst genau zu ermitteln. Es wurden nach Ausdrücken des Kokskuchens die Türen schnell geschlossen und dann in der Mitte des Ofens durch ein Fülloch ein Thermoelement eingelassen. Die heißere Luft im Ofen steigt nach oben, mischt sich mit der kälteren und werde ich so oben im Gewölbe einen guten Temperaturdurchschnitt für den Ofen bekommen. Ich fand bei verschiedenen Oefen 945°, 947°, 951° und 958°. Als Durchschnitt kann 950° angesehen werden.

In der Praxis finde ich für eine Endtemperatur im Ofen von 950° einen Wärmeverbrauch von 710 WE für ein kg nasser Kohle (Strahlungsverluste abgezogen). Bei 950° wurden nach meinem elektrischen Ofen für das kg nasser Kohle 725 WE verbraucht. Ich erzielte also in den Versuchen mit meinem elektrischen Ofen eine der Praxis bis auf 2% entsprechende Genauigkeit, mit der ich mich wohl zufrieden geben kann.

Erstens wird diese aufgeführte Wärme benutzt zur Erhitzung des Kokses auf seine Endtemperatur. Meine Messungen ergaben in der Ofenkammer eine durchschnittliche Temperatur von 950°. Die Praxis zeigte ein Koksausbringen von 82 %. Die mittlere spezifische Wärme des Kokses bei 950° ist 0,39. Es ergibt sich hiernach die im Koks enthaltene Wärme zu 300 WE.

Zweitens. Ein weiterer Teil der zugeführten Wärme entfällt auf Erwärmung der durch das Steigrohr abziehenden Gase und Dämpfe. Um diese zu berechnen, wäre es nötig, genau die zu den verschiedenen Zeitpunkten der Garungszeit ausströmen-

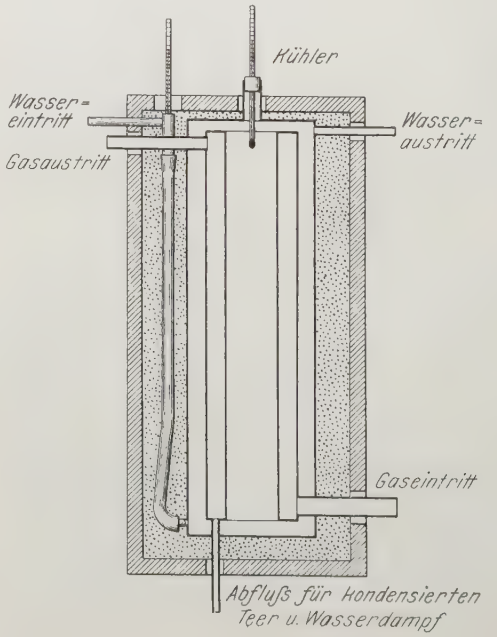


Apparaturanordnung zur Bestimmung der aus dem Steigrohr verlorengehenden Wärme.

den Wasserdampf-, Teerdampf- und Gasvolumina zu kennen, genau die spezifischen Wärmen des Gases, Wasser- und Teerdampfes zu kennen und von letzteren beiden noch die latente Verdampfungswärme, die bei Teer bei seiner wechselnden Zusammensetzung über die Garungszeit wohl schwer annähernd genau zu bestimmen ist. Diese Werte wären dann mit der im Steigrohr herrschenden Austrittstemperatur in Einklang zu bringen. Außerdem glaube ich, daß man bei Messungen am Beginn des Steigrohres zu hohe Temperaturen bekommt durch Einwirkung der Strahlung der glühenden Wände auf das eingesetzte Thermoelement.

Um all diesen Fehlermöglichkeiten aus dem Wege zu gehen, stellte ich mir eine Meßapparatur zusammen, bei der ich durch direkte kalorimetrische Messung die aus dem Steigrohr entweichende Gesamtwärme feststellte.

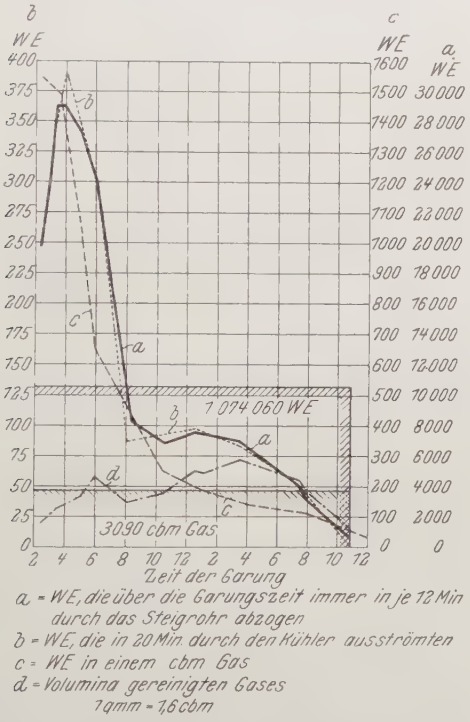
Ich baute mir einen Wasserkühler, entsprechend obenstehender Skizze, der dann, wie die kleine weitere Skizze zeigt, an das Steigrohr angeschlossen



wurde. Ich bestimmte über den Verlauf einer Garungszeit in möglichst gleichen Abständen:

A. Die Wärmemenge, die in 1 cbm permanenten Gases sowohl an der ihm selbst innewohnenden Wärme als auch in den in ihm befindlichen Wasser- und Teerdämpfen enthalten waren. Ich saugte durch meinen Kühler einfach immer dieselbe Menge Gas ab, maß das Wasservolumen, das durch den Kühler floß, und las die Temperaturerhöhung des Kühlwassers ab, analog den Wärmebestimmungen mit einem Junkerschen Kalorimeter. Hieraus kann ich leicht die Wärmeeinheiten, die in den Steigrohrgasen auf 1 cbm gereinigtes Gas enthalten sind, über die verschiedenen Zeitabschnitte der Garungszeit berechnen.

B. Ließ ich über eine bestimmte Zeit Gas frei ausströmen und maß in meinem Kühler aus Wasservolumen und Temperaturerhöhung die in 20 Minuten ausströmenden Wärmeeinheiten. Dieser

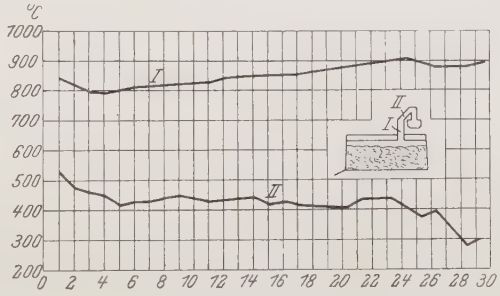


Graphische Darstellung zur Bestimmung der während einer Garungszeit durch das Steigerohr abgeführten WE.

Wert dividiert durch die in der Volumeneinheit enthaltene Wärme, die ich oben ermittelte, gibt mir das Gasvolumen, das durch meinen Kühler in 20 Minuten strömte.

Für meine Versuche hatte ich den Ofen an der Vorlage drosseln lassen, so daß ich im Ofen einen verhältnismäßig starken Ueberdruck erhielt. Ich glaube annehmen zu können, daß bei meiner Anordnung mit Wachsen des Ausströmungsvolumens durch das Steigrohr entsprechend das durch meinen Kühler abziehende Volumen wächst. Das Gasvolumen, das meinen Kühler bei freiem Austritt durchströmt, ist bei gedrosseltem Ofen über die verschiedenen Zeitabschnitte proportional den das Steigrohr durchströmenden Gasvoluminas. Ich trage alle meine Ablesungen graphisch auf (s. nebenstehend).

Die Fläche, die mir das gesamte über die Garungszeit durch den Kühler gegangene Volumen angibt, muß identisch sein der gesamten über die Garungszeit durch das Steigrohr abziehenden Gasmenge. Letztere ist mir im Destillationsversuch gegeben, und finde ich leicht aus der graphischen Darstellung die Volumina an permanentem (von Wasserdampf und Teer befreitem) Gas über die verschiedenen Abschnitte der Garungszeit. Die Multiplikation dieser Gasvolumina mit den jedesmaligen auf 1 cbm gereinigtes Gas im Steigrohr enthaltenen Wärmeeinheiten gibt mir die dasselbe über die verschiedenen Zeiträume durchfließenden Wärmemengen. Aus meiner graphischen Darstellung finde ich: im ganzen wurden über eine Garungszeit von 21 Stunden für einen Ofen 1 074 060 WE durch das Steigrohr abgeführt. Ein Ofen faßte 8,2 t, also gehen auf das kg 130 WE durch das Steigrohr verloren. Da bei meinen Versuchen das Gas mit rd. 40° aus dem Kühler austrat, so ist zu obigem Wert noch ein Zuschlag von 16 WE zu machen. Im ganzen gingen also demnach auf 1 kg nasser Kohle 146 WE durch das Steigrohr ab.



Temperaturen im Steigerohr (Nach Dipl.-Ing. Ellingen).

Um zu bestimmen, wieviel Wärme bei der trockenen Kohle in Teerdämpfen und Gasen abgeht, wäre die Wärme in Abzug zu bringen, die sich aus den 12 % Feuchtigkeit der Kohle in den Wasserdämpfen ergibt. Bei einer durchschnittlichen Temperatur von 500° angenommen (nebenstehende Kurven zeigen Temperaturmessungen, die mir von Herrn Dipl.-Ing. Ellingen zur Verfügung gestellt wurden), würde dies 96 WE ausmachen. Es verblieben somit für die Teerdämpfe und im Gase 50 WE oder auf trockene Kohle bezogen 57 WE. Auf diese Zahl wies ich zu Beginn meiner Arbeit hin, wo ich sie vorgreifend meinen Aufstellungen am elektrischen Ofen zugrunde legte.

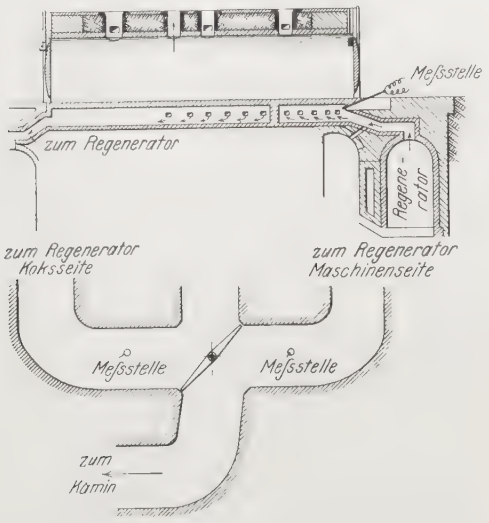
Drittens. Ferner wird ein Teil der zugeführten Wärme zur Leistung der äußeren Arbeit verbraucht. Bei den 0,3 cbm Gas, die sich aus 1 cbm nasser Kohle ergeben, würde dies 70 WE ausmachen.

Viertens. Der überbleibende Rest von 194 WE wurde für die trockene Destillation demnach verbraucht.

Doppel-Regenerativ-Koksofen-Batterie.

Dieselbe Kohle wurde ferner in zwei nebeneinanderstehenden Regenerativ-Koksofen-Batterien (gebaut Batterie I: 1909, Batterie II: 1911) verkokt. Es ist mir so Gelegenheit gegeben, auch an zwei weiteren Stellen meine im Laboratorium für den Wärmeverbrauch eines kg Kohle gefundenen Zahlen mit der Praxis zu vergleichen und schließlich auch meine theoretischen Aufstellungen über zu erwartende Ueberschußgasenergie der Praxis gegenüberzustellen.

Die Doppel-Regenerativ-Batterie setzte sich aus zwei Batterien von je 50 Oefen zusammen. Es wurden täglich 84 Oefen gedrückt und 700 t nasser Kohle durchgesetzt.



Regenerativofen.

Zuerst stellte ich, wie bei der Abhitzebatterie, die auf 1 cbm Gas im Ofen verbleibende Wärme fest. Meine Meßstellen legte ich direkt hinter die Regeneratoren vor die Wechselklappe. Ich war so sicher, daß durch Undichtigkeiten in der Wechselklappe meine Versuche nicht beeinträchtigt werden konnten.

Durch ein in das Mauerwerk angebrachtes Loch wurde ein Stickstoffthermometer eingelassen und ferner eine Porzellanröhre zum Absaugen der Abgase für die Analysen. Das Loch wurde dann mit Lehm möglichst luftdicht wieder verschmiert. Die gemessenen Temperaturen stellte ich in nebenstehende Kurven zusammen und ermittelte aus dieser graphischen Darstellung dann die durchschnittl'chen Temperaturen. Ferner wurde über die Zeit der Messungen eine Durchschnittsheizgasprobe langsam für die Gesamtanalyse abgesaugt.

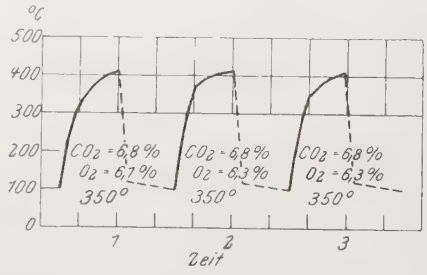
Messungen, ausgeführt am 11. August 1913.

Die Analyse des Heizgases hatte folgende Zusammensetzung; es errechnen sich daraus die sich aus 1 cbm Gas ergebenden Rauchgase:

	%	CO_2	H_2O	O_2	Oberer Heizwert
CO_2 . .	1,2	0,012	—	—	—
C_2H_4 . .	2,0	0,04	0,04	0,06	300
C_6H_6 . .	0,3	0,018	0,009	0,0225	1032
O_2 . . .	0,9	—	—	—	—
CO . .	5,8	0,058	—	0,029	175,6
CH_4 . .	26,1	0,261	0,522	0,522	2486
H_2 . . .	55,8	—	0,558	0,279	1700
N_2 . . .	7,8	—	—	—	—
		0,389	1,129	0,855	4764,8
				— 0,009	
				= 0,846	

Bei vollkommener Verbrennung, ohne Luftüberschuß, ergibt somit 1 cbm Gas

an CO_2 . . . . . = 0,389 cbm
an N_2 . . . . . = 3,298 „
zusammen trockenes Rauchgas . = 3,687 cbm



Batterie I. Koksseite vor der Wechselklappe.

1. Batterie I, Koksseite vor der Wechselklappe: Aus nebenstehender graphischer Darstellung ermittelte ich eine durchschnittliche Temperatur von 350 ° und aus den Analysen nehme ich eine

Gaszusammensetzung von 6,8 % CO_2 und 6,2 % O_2 an.

Hieraus ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 1,51 cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2 . . . . . = 0,389 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung. 1,129
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18° 0,020
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft 0,0824
an Wasserdampf in der Ueberschußluft 0,030

zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,2624 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff . = 4,808 „

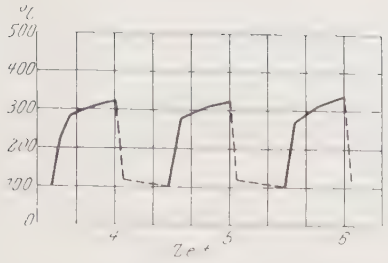
Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 350 ° bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

für CO_2 . . . . . = 0,438
„ Wasserdampf . . . . . = 0,4062
„ permanente Gase . . . . . = 0,3168

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,389 . 0,438 . 330 = 57,5 WE
Wasserdampf . . = 1,2614 . 0,406 . 330 = 174,0 „
permanente Gase . = 4,808 . 0,3168 . 330 = 517,0 „
zusammen = 748,5 WE

Da 1 cbm Gas 4764 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4016 WE. Durch den Kamin gingen demnach 15,7 % verloren.



Batteri II. Koksseite vor der Wechselklappe.

2. Batterie II, Koksseite vor der Wechselklappe:

a) Gaszusammensetzung 6,8 % CO_2
7,6 % O_2.

Hieraus ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 1,98 cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,389 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung.	1,129	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,0824	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,039	
zweitens an Wasserdampf		= 1,2704 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff .		= 5,27 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 300 ° bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

für CO_2	= 0,4297
„ Wasserdampf	= 0,3998
„ permanente Gase	= 0,31266

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

CO_2	= 0,389	. 0,4297	. 280 =	46,7 WE
Wasserdampf . .	= 1,2704	. 0,3998	. 280 =	142,0 „
permanente Gase .	= 5,27	. 0,31266	. 280 =	456,0 „
				644,7 WE

Da 1 cbm Gas 4764 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4119 WE. Durch den Kamin gingen demnach 13,5 % verloren.

b) Gaszusammensetzung 5,9 % CO_2
8,5 % O_2

mittlere Temperatur 298 °.

Hieraus ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 2,46 cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,389 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung.	1,129	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,0824	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,049	
zweitens an Wasserdampf		= 1,2804 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff .		= 5,75 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 298 ° bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

für CO_2	= 0,4297
„ Wasserdampf	= 0,3998
„ permanente Gase	= 0,3126

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

CO_2	= 0,389	. 0,4297	. 278 =	46,5 WE
Wasserdampf . .	= 1,2804	. 0,3998	. 278 =	142,0 „
permanente Gase .	= 5,75	. 0,31266	. 278 =	498,0 „
				zusammen 686,4 WE

Da 1 cbm Gas 4764 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4078 WE. Durch den Kamin gingen demnach 14,4 % verloren.

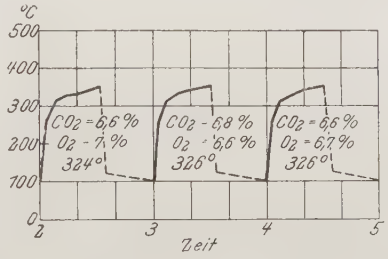
Messungen, ausgeführt am 15. August 1913.

Die Analyse des Heizgases hatte folgende Zusammensetzung; hieraus errechnen sich die aus 1 cbm Gas entstehenden Rauchgase:

	%	CO_2 cbm	H_2O cbm	O_2 cbm	Oberer Heizwert
CO_2 . .	1,8	0,018	—	—	—
C_2H_4 . .	2,6	0,052	0,052	0,078	388
C_6H_6 . .	0,3	0,018	0,009	0,0225	103,2
O_2 . . .	1,6	—	—	—	—
CO . .	4,8	0,048	—	0,024	145,6
CH_4 . .	27,2	0,272	0,544	0,544	2590
H_2 . . .	51,9	—	0,519	0,259	1582
N_2 . . .	9,8	—	—	—	—
		0,408	1,124	0,9275	4808,8 WE
				= 0,016	
				= 0,9115	

Bei vollkommener Verbrennung ohne Luftüberschuß ergibt somit 1 cbm Gas

an CO_2	= 0,408 cbm
„ N_2	= 3,528 „
zusammen trockenes Rauchgas .	= 3,936 cbm



Batterie I. Maschinenseite vor der Wechselklappe.

1. Batterie I, Maschinenseite vor der Wechselklappe:

a) bei 6,6 % CO_2 und
7 % O_2

ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 1,968 cbm. Die mittlere Temperatur betrug 324 °.
1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2		= 0,408 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung.	1,124	
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18°	0,020	
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft	0,085	
an Wasserdampf in der Ueberschußluft	0,039	
zweitens an Wasserdampf		= 1,266 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff .		= 5,496 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 324 ° bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

für CO_2 . . . . . = 0,4338
„ Wasserdampf . . . . . = 0,4028
„ permanente Gase . . . . . = 0,31335

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,48 0,4338 . 304 = 53,7 WE
Wasserdampf . . = 1,266 . 0,4028 . 304 = 155,0 „
permanente Gase . = 5,496 . 0,31335 . 304 = 524,0 „

zusammen = 732,7 WE

Da 1 cbm Gas 4808 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4076 WE. Durch den Kamin gingen demnach 15 % verloren.

b) Gaszusammensetzung 6,8 % CO_2
6,6 % O_2.

Hieraus ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 1,8 cbm.

erstens an CO_2 . . . . . = 0,408 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung. 1,124
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18° 0,020
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft 0,085
an Wasserdampf in der Ueberschußluft 0,036

zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,263 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff . = 5,328 „

Die mittlere spezifische Wärme für eine Temperatur von 326 ° bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

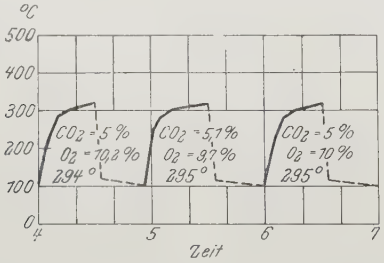
für CO_2 . . . . . = 0,4338
„ Wasserdampf . . . . . = 0,4029
„ permanente Gase . . . . . = 0,36335

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

CO_2 . . . . . = 0,408 . 0,4338 . 306 = 54,0 WE
Wasserdampf . . . = 1,263 . 0,4028 . 306 = 155,8 „
permanente Gase . = 5,328 . 0,36335 . 306 = 510,0 „

zusammen = 719,8 WE

Da 1 cbm Gas 4808 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4088 WE. Durch den Kamin gingen demnach 14,9 % verloren.



Batterie II. Maschinenseite vor der Wechselklappe.

2. Batterie II, Maschinenseite vor der Wechselklappe:

Gaszusammensetzung 5,1 % CO_2
9,7 % O_2.

Hieraus ermittelt sich ein Luftüberschuß pro 1 cbm Gas von 3,38 cbm.

1 cbm Gas gibt somit

erstens an CO_2 . . . . . = 0,408 cbm
an Wasserdampf durch Verbrennung. 1,124
an Wasserdampf in 1 cbm Gas bei 18° 0,020
an Wasserdampf in der Verbrennungsluft 0,085
an Wasserdampf in der Ueberschußluft 0,067

zweitens an Wasserdampf . . . . . = 1,296 cbm
drittens an Stickstoff und Sauerstoff . = 6,908 „

Die mittlere Temperatur betrug 294 °. Die mittlere spezifische Wärme für diese Temperatur bei einer Außentemperatur der Luft von 20 ° betrug

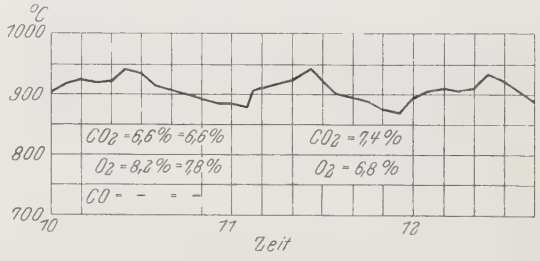
für CO_2 . . . . . = 0,4288
„ Wasserdampf . . . . . = 0,399
„ permanente Gase . . . . . = 0,3134

Die in den Kamin auf 1 cbm Gas entweichende Wärme berechnet sich demnach wie folgt:

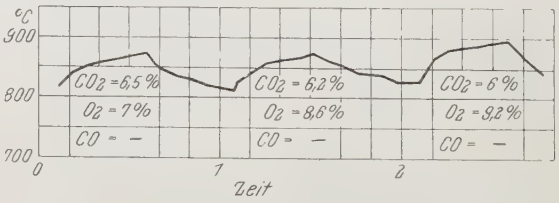
CO_2 . . . . . = 0,408 . 0,4288 . 274 = 48,1 WE
Wasserdampf . . . = 1,296 . 0,399 . 274 = 141,0 „
permanente Gase . . = 6,908 . 0,3134 . 274 = 592,0 „

zusammen = 781,1 WE

Da 1 cbm Gas 4808 WE zuführt, so verblieben im Ofen 4027 WE. Durch den Kamin gingen demnach 16,2 % verloren.



Ofen 94. Temperaturen im Fuchs.



Ofen 98. Temperaturen im Fuchs.

Ich fand so nach Vorigem einen Kaminverlust von 15,7 %, 13,5 %, 14,4 %, 15 %, 14,9 %, 16,2 %. Der Durchschnitt hiervon wäre 15 %, und lege ich diesen für meine späteren Berechnungen als Kaminverlust zugrunde. Ich gebe außerdem noch eventuellen Interesses halber in obenstehenden Kurven die in den Füchsen einiger Oefen von Batterie II auf der Maschinenseite gemessenen Temperaturen. Auf Grund dieser Zahlen eine Wärmebilanz aufzustellen, halte ich nicht für richtig:

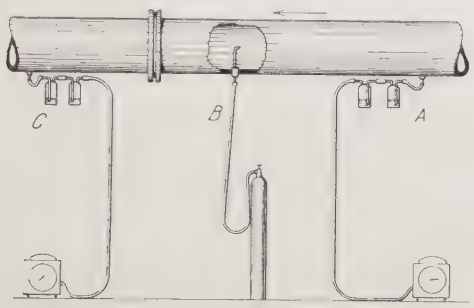
erstens, weil ich nicht die entsprechenden Temperaturen auf der Koksseite messen konnte wegen Unzugänglichkeit der Füchse;

zweitens, da in höheren Temperaturen die Angaben über spezifische Wärme sehr schwanken und so meine Berechnung bei einem Regenerativofen, bei dessen Wärmebilanz die spezifischen Wärmen sowohl in der Verbrennungsluft als in der Abhitze Anwendung finden müssen, recht großen Fehlermöglichkeiten ausgesetzt wäre.

Gasmessungen.

Ich schreite nun zu den Gasmessungen. Herr Dr. Grahl hatte in der Praxis viel und mit sehr gutem Erfolge die Ammoniakmethode angewandt, und er war so freundlich, mir seine Vergleichszahlen mit einer in die Betriebsgasleitung eingebauten Gasuhr zur Verfügung zu stellen. Für eventuell in die Ammoniakmethode nicht Eingeweihte folgende Beschreibung derselben:

An Stelle A (siehe nebenstehende Skizze) wird mit vorgelegter Schwefelsäure der in einem cbm im Gramm enthaltene Ammoniakgehalt festgestellt; bei B wird aus einer Ammoniakbombe eine bestimmte durch Gewichtsabnahme der Bombe festgestellte Ammoniakmenge in die Leitung geschickt.



Ammoniakmethode.

Bei C wird wiederum mittels vorgelegter Schwefelsäure die nunmehr im cbm enthaltene Gasmenge bestimmt. Die Differenz mit A gibt mir die Ammoniakmenge, die auf 1 cbm Gas von der zugeführten Menge aus der Bombe entfallen ist. Dividiere ich diese Zahl in die Gesamtmenge des verbrauchten Ammoniaks, so erhalte ich die Gasmenge, die in der Zeitdauer des Versuches die Gasleitung passiert hat. Diese Menge muß natürlich dann noch auf 0 ° und 760 mm Barometerstand umgerechnet werden.

Nach Herrn Dr. Grahl sind bei der Methode folgende Punkte zu beachten:

1. Das Gas muß so trocken sein, daß man sicher ist, daß keine Kondensation auf dem Wege von A bis C eingetreten ist, wodurch Ammoniakverluste entstehen würden.

2. An den Klemmschrauben der Leitungen von A und C zu den kleinen Gasuhren darf nichts während des Versuches verstellt werden. Druckäußerungen in der Leitung müssen sich in den Durchflußmengen in den Gasuhren bemerkbar machen.

3. Die Zuflußmenge an Ammoniak kann verändert werden während des Versuches.

Um dies nachzuweisen, hatte Herr Dr. Grahl folgende Versuche vorgenommen und mir freundlicherweise die Versuchszahlen zur Verfügung gestellt.

Erster Versuch: Die Apparate wurden angeschlossen, an den Leitungen zu den kleinen Gasuhren wurde nichts verändert, während mit der eingeführten Ammoniakmenge gewechselt wurde. Der Maschinist war angewiesen, die erste Stunde 3000 cbm, die zweite 2000 und die dritte 1000 cbm durch die Leitung zu drücken. Zur besseren Uebersicht des Versuches folgende Tabelle:

	1. Stunde	2. Stunde	3. Stunde
zugeführtes NH_3 . . .	1000	1500	2000 g
Der Gasmesser der Anlage zeigte an . . .	3000	2000	1000 cbm
Gasmenge l pro St. durch die kleine Gasuhr .	300	200	100 l
NH_3 f. d. cbm	0,33	0,75	2,0 g
NH_3, absorbiert von der Säure	0,11	0,15	0,2 g

Die Gasuhr der Kokerei zeigte somit einen Gasverbrauch von 6000 cbm.

In drei Stunden haben 300 + 200 + 100 = 600 l Gas die Gasuhr passiert und 0,11 + 0,15 + 0,2 = 0,46 g NH_3 sind an die Säure abgegeben worden. 1 cbm Gas enthält somit 0,75 g NH_3. Hieraus berechnet sich die Gasmenge zu $\frac{1000 + 1500 + 2000}{0,75}$ = 6000 cbm in drei Stunden.

Zweiter Versuch: Der Gang der Gasuhr wurde beeinflußt, so daß konstant 300 l in der Stunde die Uhr passierten. Herr Dr. Grahl bekam dann folgende Versuchsergebnisse:

	1. Stunde	2. Stunde	3. Stunde
zugeführtes NH_3 . . .	1000	1500	2000 g
Der Gasmesser der Anlage zeigte an . . .	3000	2000	1000 cbm
Gasmenge l i. d. St. durch die kleine Gasuhr. .	300	300	300 l
NH_3 pro cbm	0,33	0,75	2,0 g
NH_3 absorbiert von der Säure	0,11	0,275	0,666 g

in drei Stunden haben also 3 . 300 = 900 l die kleine Gasuhr passiert und 0,11 + 0,275 + 0,666 = 1,05 g NH_3 sind an die Säure abgegeben. 1 cbm Gas enthält demnach $\frac{1,05 \,.\, 1000}{900}$ = 1,17 g NH_3 pro cbm. Hieraus berechnet sich die Gasmenge zu $\frac{1000 + 1500 + 2000}{1,17}$ = 4000 cbm in drei Stunden. Die Gasuhr der Anlage zeigte aber 6000 cbm an. Hierdurch ist deutlich nachgewiesen, daß man durch Stellen an den Quetschhähnen der Gasleitungen zu den kleinen Gasuhren falsche Werte erzielen würde.

Durch meine Messungen bestimmte ich zuerst das jeder Batterie zugeführte Gas. Mittels der Ammoniakmethode fand ich:

Batterie I	Batterie II
am 4. August 1913	
59000 cbm (0° und 760 B.)	67250 cbm (0° und 760 B.)
am 6. August 1913	
64000 cbm (0° und 760 B.)	58 200 cbm (0° und 760 B.)
durchschnittlich demnach	
61500 cbm (0° und 760 B.	62700 cbm (0° und 760 B.)

[illegible] neben mir den Gasverbrauch [illegible]

[illegible] Kontrolle stellte ich Messungen mit [illegible] Fueß, Steglitz, hergestellten Staudoppelrohr an, dessen Korrektionsfaktor 0,99 bis 1,01 nicht übersteigt. Die Uebereinstimmung [illegible] gefundenen Werte mit der Ammoniakmethode [illegible]gte mir die Richtigkeit dieser von der Firma Fueß [illegible]ufgestellten Behauptung.

Um die Stelle der mittleren Geschwindigkeit in [illegible]er Rohre zu ermitteln, machte ich zuerst bei zwei Rohren radiale Messungen.

Rohr 1 (Durchmesser 45 cm) annähernde Geschwindigkeit 5 m sek.

Ich fand in verschiedenen Höhen folgende Staudrücke (da die Geschwindigkeit den Wurzeln der Staudrücke proportional ist, so führe ich gleich die Wurzel mit an, um ein besseres Bild über die Zunahme der Geschwindigkeit nach der Mitte des Rohres zu bekommen):

Am Rande			$\sqrt{}$ 1,2	= 1,1
6 cm	vom	„	$\sqrt{}$ 1,65	= 1,33
8 „	„	„	$\sqrt{}$ 1,9	= 1,38
11,5 „	„	„	$\sqrt{}$ 2	= 1,415
16 „	„	„	$\sqrt{}$ 2	= 1,415
20,5 „	„	„	$\sqrt{}$ 2,05	= 1,43

Rohr 2 (Durchmesser 35 cm) annähernde Geschwindigkeit 10 m sek.

Ich fand in verschiedenen Entfernungen vom Rande folgende Wurzeln der Staudrücke:

am Rande				= 1.25
4,5 cm	vom	Rande	. . . .	= 1,42
9,5 „	„	„	. . . .	= 1,47
13,5 „	„	„	. . . .	= 1,5
19,5 „	„	„	. . . .	= 1,6

Aus diesen Zahlen ermittelt sich die Stelle der mittleren Geschwindigkeit in einer Entfernung von 8 bis 10 cm vom Rande und gab ich daher bei allen meinen späteren Messungen meinem Staurohr diese Tauchung.

Während der Gasmessungen wurde in einem Gasreceiver eine Gasprobe abgezogen und nachher mit dem Schillingschen Apparat das spezifische Gewicht des Gases bestimmt. Die Gasgeschwindigkeit berechnet sich nach der bekannten Formel

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{s}}$$

h gibt mir den Druck in kg, s das spezifische Gewicht des Gases gegen Wasser. Aus meinen Messungen ergaben sich folgende Gasmengen:

11. August 1913.

Batterie I	Batterie II
60000 cbm (0° und 760 B.	62500 cbm (0° und 760 B.)

Ich schreite nun zur Berechnung der für 1 kg Kohle verbrauchten WE und lege diesen Berechnungen den Durchschnitt meiner gefundenen Gaswerte zugrunde. Ich finde so:

Batterie I

für 1 kg nasser Kohle $\frac{4044 \cdot 60750}{350\,000} = 696$ WE

$\frac{4106 \cdot 60750}{350\,000} = 712$ „

durchschnittlich rd. 700 „

Batterie II

für 1 kg nasser Kohle $\frac{4120 \cdot 62600}{350\,000} = 737$ WE

$\frac{4083 \cdot 62600}{350\,000} = 730$ „

$\frac{4032 \cdot 62600}{350\,000} = 720$ „

durchschnittlich rd. 730 „

Ich nahm dann, wie bei der Abhitzebatterie, auch an diesen Batterien direkt nach dem Drücken in der Mitte der Ofenkammer Messungen vor und fand

für Batterie I eine durchschnittliche Temperatur von . . . . . 846°
für Batterie II eine durchschnittliche Temperatur von . . . . . 910°

Für Strahlungsverluste nehme ich analog meinen Messungen am Abhitzeofen 5,3% an. Dies macht für die Batterie

die Batterie I . . . . . = 37 WE
„ „ II . . . . . = 39 „

Für die bloße Verkokung, ohne Strahlungs- und Kaminverluste, wurde somit für 1 kg nasser Kohle

bei Batterie I = 663 WE bei einer Ofen-Endtemperatur von . . . . . 846°
bei Batterie II = 690 WE bei einer Ofen-Endtemperatur von . . . . . 910°

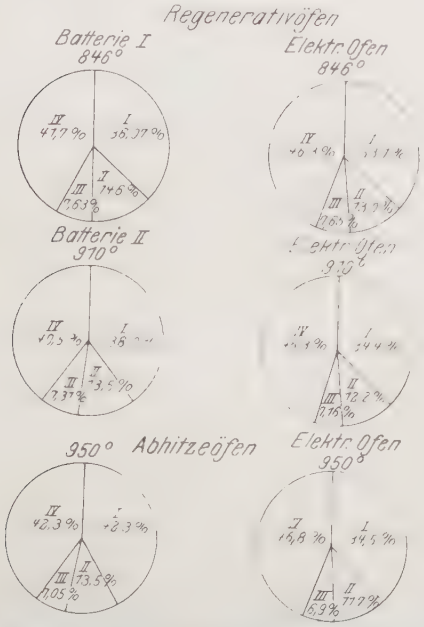
verbraucht. Bei meinen Verkokungen im elektrischen Ofen fand ich bei einer Temperatur von 846 ° 660 WE, von 910 ° 705 WE. Diese beiden Werte stimmen ebenfalls gut mit den Werten der Praxis überein. Im Durchschnitt zeigen die Werte bei meiner Verkokung im elektrischen Ofen rd. 10 WE höher. Dies ist erklärlich durch die größere Zersetzung von Teerdämpfen im Koksofen gegenüber dem elektrischen Ofen, wie dies ja aus den am Anfang meiner Arbeit ausgeführten Versuchen hervorgeht. Nach D. Barnum muß dieser Prozeß wärmeabgebend verlaufen. Es erklärt sich so ebenfalls das Wachsen der Wärme im Kokskuchen in der Praxis gegenüber den Versuchen des elektrischen Ofens auf Kosten der zur Destillation aufgewandten Wärme, ohne Ansteigen der gesamten verbrauchten Wärme. Die Verkokungswärme im Koksofen stellt sich danach gegenüber der im elektrischen Ofen folgendermaßen zusammen:

	Batterie I	Elektr. Ofen
im Koks	236 WE	216 WE
„ Wasserdampf	96 „	85 „
in Teerdämpfen und Gas . .	50 „	50 „
für Destillation	274 „	302 „

	Batterie II	Elektr. Ofen
im Koks	260 WE	240 WE
„ Wasserdampf	96 „	85 „
in Teerdämpfen und Gas . .	50 „	50 „
für Destillation	277 „	323 „

Nach Obigem stellt sich die Wärmebilanz beim Abhitzeofen bei einer Temperatur von 950 ° gegenüber dem elektrischen Ofen folgendermaßen:

	Batterie I	Elektr. Ofen
im Koks	300 WE	250 WE
„ Wasserdampf	96 „	85 „
in Teerdämpfen und Gas . .	50 „	50 „
für Destillation	264 „	340 „



Graphisch-prozentuale Zusammenstellung der in der Praxis und theoretisch ermittelte Wärmebilanzen.
I im Koks,
II im Wasserdampf,
III in den Teerdämpfen,
IV für Destillation.

Ich habe im Vorigen das Uebereinstimmen der im elektrischen Ofen gefundenen Gesamtverkokungswärme mit der der Praxis entnommenen nachgewiesen, und zugleich gezeigt, daß die Verschiedenheit der im Koks enthaltenen Wärme sich mit der Destillationswärme ausgleicht. Ich bin somit berechtigt, die im elektrischen Ofen gefundenen Werte als für den Wärmeverbrauch in der Praxis zu erwartende Zahlen anzusehen.

Im Beginn meiner Arbeit legte ich für die zu erwartende Ueberschußenergie die aus dem Destillationsversuch gefundenen Ergebnisse zugrunde. Ich fand, die Strahlungsverluste und Kaminverluste unberücksichtigt gelassen, bei meiner vorliegenden Kohle (12 % Feuchtigkeit) einen zu erwartenden Gasenergieüberschuß von 55 %. Bei einer Strahlung von 5 % und einem Kaminverlust von 15 %, wie beide ermittelt wurden, würde demnach ein Gasenergieüberschuß von 43,8 % sich ergeben.

Ich stellte nun Gasmessungen an zur Ermittelung des tatsächlichen, sich in der Praxis ergebenden Ueberschusses.

Auf obiger Koksofenanlage wurde das Ueberschußgas teils zu Leuchtzwecken an die Stadt abgegeben, teils im eigenen Betriebe verbr[illegible] der Leuchtgasleitung war eine Gasuhr eingeb[illegible] und konnte hier somit leicht die verbrauchte G[illegible] menge abgelesen werden. Es blieb nun [illegible] übrig, die Ueberschußgasmenge für den Ba[illegible] und ferner das während dieser Zeit den Oefen z[illegible] führte Gesamtgas zu bestimmen.

Zu gleicher Zeit stellte ich mittel[illegible] schriebenen Ammoniakmethode die im Betrieb[illegible] brauchte Ueberschußgasmenge fest und ferner [illegible] während dieser Zeit den Oefen wieder zugeführten Mengen. In der Gesamtleitung wurden zur K[illegible] trolle beide Mengen insgesamt mit dem [illegible] rohr gemessen.

Ich fand so

1. Ammoniakmethode

Ueberschußgas	Verbrauchsgas der Oefen innerhalb 24 Stunden
78500 cbm (0° und 760 B.)	124000 cbm (0° und 760 B.

2. mit dem Staudoppelrohr

fand ich eine Gesamtgasmenge innerhalb 24 Stunden von 199000 cbm (0° und 760 B.).

Die Leuchtgasuhr zeigte mir 19000 cbm Ga[illegible] auf 24 Stunden während meiner Messungen an. Das Leuchtgas hatte 5000 Kal., während Betriebsüberschuß- und Verbrauchsgas der Oefen 4750 Kal hatten.

Hieraus errechnet sich eine Ueberschußwärmeenergie im Gase von

$$4750 \cdot 78\,500 = 373\,000\,000 \text{ WE}$$
$$+ 5000 \cdot 19\,000 = 95\,000\,000$$

Hinzu kommt noch die im ausgewaschenen Benzol enthaltene Wärmeenergie. Es wurden innerhalb 24 Stunden 4100 kg Benzol ausgewaschen. Diese geben 41 000 000 WE. Demgegenüber wurden für Beheizung der Oefen verbraucht

$$124\,000 \cdot 4\,750 = 589\,000\,000 \text{ WE}$$

Insgesamt ergibt sich daraus für die Kokere[illegible] eine Wärmemenge von

	1 097 000 000 WE
unter den Oefen verbraucht .	[illegible]
es verbleiben somit	508 000 000 WE
oder = 46,3 %,	

die als Ueberschußwärmeenergie im Gas zur Verfügung ständen.

Dieser Wert der Praxis mußte günstiger ausfallen als der von mir theoretisch ermittelte, dem ich die Gesamtenergie aus dem Destillationsversuch = 1 040 000 000 WE zugrunde legte, die nach Obigem hinter der der Praxis etwas zurücksteht.

Hieraus kann ich die Folgerung ziehen, daß bei dem Destillationsversuch eine etwas niedrigere Temperatur als die der Praxis herrschte. Ich nehme also anstatt 870 ° eine entsprechend niedrigere Temperatur von 840 ° an, die dem Destillationsversuch zugrunde zu legen wäre, um dann bei dieser Temperatur den Wärmeverbrauch im elektrischen Ofen zu ermitteln.

Ich fände dann theoretisch einen Ueberschußenergiewert von 45.5 % und ohne Strahlung und

Kaminverlust von 56,4 %. Dieser Wert deckt sich genügend mit dem in der Praxis ermittelten und lege ich somit 840° als Verkokungsendtemperatur für Ueberschußenergieberechnungen aus dem Destillationsversuch zugrunde.

Mein elektrischer Ofen ist somit gegenüber dem Destillationsversuch geeicht und können Zahlenergebnisse beider jetzt gegeneinander Verwendung finden.

Dritter Teil.

Im folgenden gehe ich dazu über, Verkokungen mit verschiedenen Kohlen vorzunehmen. Die Werte des Destillationsversuches derselben Kohlen standen mir zur Verfügung und werde ich auf Grund dieser Zahlen dann die zu erwartende Ueberschußgasenergie berechnen.

Fünf Kohlen griff ich für meine Versuche heraus. Dieselben zeigten in bezug auf ihr Koksausbringen nach Muck folgende Verschiedenheiten:

85,5 % 79,5 % 75,8 % 70,53 % 66 %.

Ich führte meine Versuche im elektrischen Ofen mit trockener Kohle aus, und zwar bei der oben festgesetzten Temperatur von 840°, und fand folgende Versuchsergebnisse:

	Koksausbringen nach Muck	pro kg trockener Kohle verbrauchte WE
1.	85,5 %	600
2.	79,5 %	632
3.	75,8 %	650
4.	70,53%	625
5.	66,0 %	615

Die Destillationsversuche zeigten folgende Ergebnisse:

Kohle 1.

Teerwasser	= 3,33 %
CO_2	= 1,07 %
C_6H_6	= 0,47 %
Teer	= 0,27 %
Koks	= 87,1 %

1 kg Kohle = 0,2198 cbm bei 0° und 760 B. ohne CO_2 und C_6H_6.

Gasanalyse:		Oberer Heizwert
SKw	= 1,2 %	218
CO	= 3,9 %	118,5
H_2	= 65,5 %	2000
CH_4	= 26,8 %	2560
N_2	= 2,6 %	—

insgesamt 4896,5 WE

Die Kohle gibt somit 1076 WE in Gasenergie; hierzu kommen die im ausgewaschenen Benzol enthaltenen 46,3 % WE. Im ganzen ständen dann im Gase 1121 WE zur Verfügung. Da nach Obigem 600 WE benötigt werden, so ständen 521,3 WE = 46,5 % als Ueberschußgasenergie zur Verfügung.

Kohle 2.

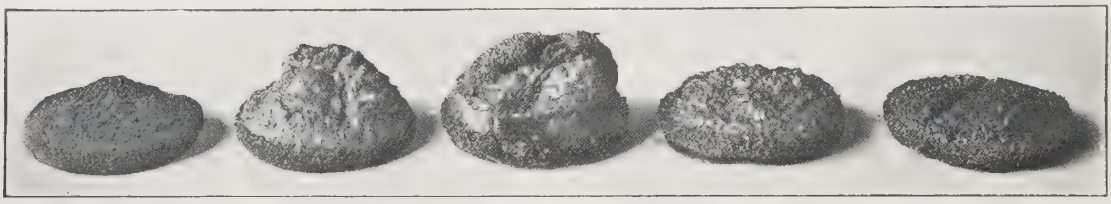
Teerwasser	= 3,50 %
CO_2	= 0,79 %
C_6H_6	= 0,7 %
Teer	= 2,42 %
Koks	= 83,07 %

1 kg Kohle = 0,2491 cbm bei 0° und 760 B. ohne CO_2 und C_6H_6.

Gasanalyse:		Oberer Heizwert
SKw	= 1,9 %	323
CO	= 5,4 %	164
H_2	= 59,2 %	1810
CH_4	= 32,4 %	3080
N_2	= 1,1 %	—

insgesamt 5377 WE

Die Kohle gibt somit 1340 WE in Gasenergie; hierzu kommen die im ausgewaschenen Benzol enthaltenen 69 WE. Im ganzen ständen dann im Gase 1409 WE zur Verfügung. Da nach Obigem 632 WE benötigt werden, so ständen 777 WE 55 % als Ueberschußgasenergie zur Verfügung.



1 2 3 4 5

Photographie des Tiegelkokskuchens.

Kohle 3.

Diese Kohle diente auch zu den Versuchen im Beginn meiner Arbeit und führe ich gleich hier die Endzahlen an.

Im ganzen standen im Gase 1689 WE zur Verfügung. 1 kg benötigt 650 WE. Es ständen somit an Gasüberschußenergie 1039 WE oder 61,5 % zur Verfügung.

Kohle 4.

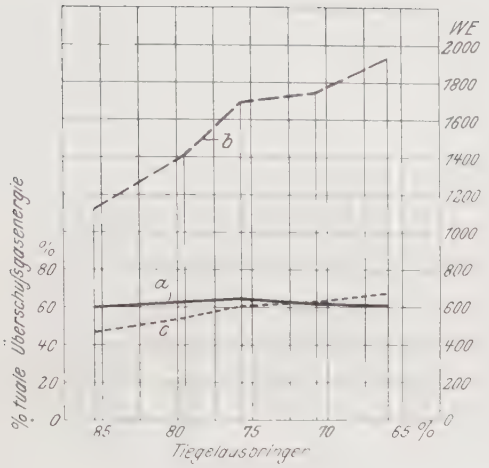
Teerwasser	= 5,71 %
CO_2	= 1,17 %
C_6H_6	= 1,16 %
Teer	= 3,09 %
Koks	= 76,59 %

1 kg Kohle = 0,293 cbm bei 0° und 760 B. ohne CO_2 und C_6H_6.

Gasanalyse:		Oberer Heizwert
SKw	= 3,9 %	639
CO	= 7,3 %	221,5
H_2	= 55,5 %	1693
CH_4	= 31,2 %	2980
N_2	= 2,1 %	—

insgesamt 5543,5 WE

Die Kohle gibt somit 1630 WE in Gasenergie; hierzu kommen die im ausgewaschenen Benzol ent-



Trockene Kohle verkokt.
a = Zur Verkokung verbrauchte WE.
b = WE aus 1 kg trockene Kohle in Gasenergie.
c = prozentuale Ueberschußenergie.

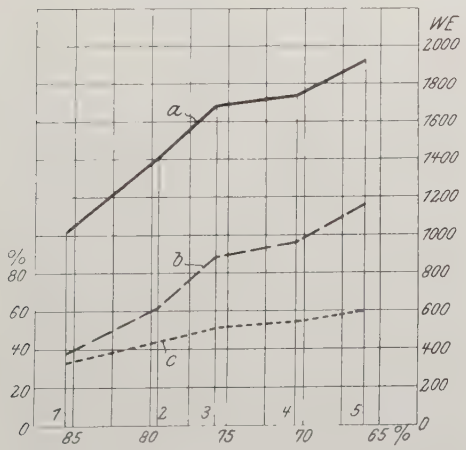
haltenen 114 WE. Im ganzen ständen dann im Gase 1744 WE zur Verfügung. Da nach Obigem 625 WE benötigt werden, so verbleiben 1119 WE = 64 % als Ueberschußenergie.

Kohle 5.

Teerwasser . .	=	6,7 %
CO_2	=	1,66 %
C_6H_6	=	1,68 %
Teer	=	3,43 %
Koks	=	72,29 %

1 kg Kohle. . . . . = 0,300 cbm Gas von 0° und 760 B ohne CO_2 und C_6H_6.

Gasanalyse:			Oberer Heizwert
SKw	=	6,2 %	983
CO	=	9,7 %	294
H_2	=	51,4 %	1570
CH_4	=	32,0 %	3045
N_2.	=	0,7 %	—
		insgesamt	5892 WE



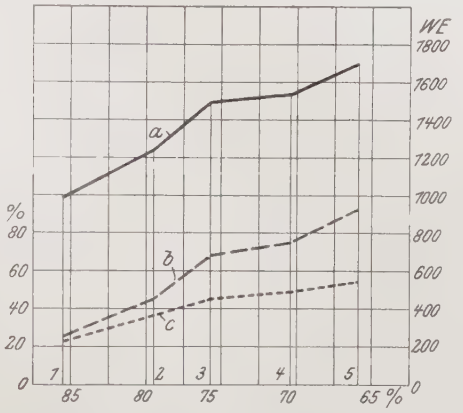
Trockene Kohle verkokt mit 20 % Kaminverlust.
a = Gesamt-WE aus 1 kg trockene Kohle.
b = Ueberschuß WE.
c = prozentuale Ueberschußenergie.

Die Kohle gibt somit 1770 WE in Gasenergie; hierzu kommen die im ausgewaschenen Benzol enthaltenen 165 WE. Im ganzen ständen dann im Gase 1935 WE zur Verfügung. Da nach Obigem 615 WE benötigt werden, so verbleiben 1320 WE = 68 % als Ueberschußenergie.

Die vorigen Betrachtungen beziehen sich auf den Idealfall, daß die Kohle trocken ist und keine Kamin- und Strahlungsverluste verloren gehen.

Bei einer trockenen Kohle mit einem Kamin- und Strahlungsverlust bei einer Verkokung von 20 % ergeben sich folgende Zahlen:

Kohle	Gesamtgas-Energie WE	Ueberschuß-gas-Energie WE	= %
1.	1121,3	371	33,0
2.	1409,0	619	44,0
3.	1689,0	877	52,0
4.	1744,0	964	55,2
5.	1935,0	1167	60,3



Nasse Kohle (12 % Feuchtigkeit) verkokt mit 20 % Kaminverlust.
a = Gesamt-WE aus 1 kg nasse Kohle.
b = Ueberschuß WE.
c = prozentuale Ueberschußenergie.

Bei einer nassen Kohle mit 12 % Feuchtigkeit und einem Kamin- und Strahlungsverlust bei der Verkokung von 20 % ergeben sich folgende Zahlen:

Kohle	Gesamtgas-Energie WE	Ueberschuß-gas-Energie WE	= %
1. . . .	985,0	225	23,0
2.	1240,0	446	36,0
3. . . .	1490,0	678	45,5
4.	1537,0	749	49,0
5.	1700,0	925	54,4

Diese letzte Tabelle gibt mir diejenigen Ueberschußgasenergien, aufgestellt unter Zugrundelegung meiner Untersuchungen, mit denen heutzutage in der Praxis demnach zu rechnen wäre.

Vierter Teil.

Die Frage ist, ob die ermittelte Ueberschußenergie noch zu vergrößern wäre.

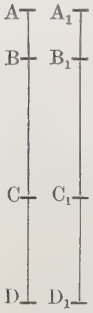
A. Dies wäre möglich durch Erhöhung der Gesamtgaswärme aus 1 kg Verkokungsprodukt.

Dies ist der Fall bei der Verkokung einer möglichst trockenen Kohle. Ich weise hin auf die Tabellen auf Seite 29, aus denen klar durch Gegenüberstellung der nassen gegen die trockene Kohle dieser Vorteil hervorgeht und hier wohl keiner weiteren Erläuterung mehr bedarf.

B. Durch möglichste Erniedrigung des Wärmeverbrauchs zur Verkokung in der Praxis auf die theoretisch erforderliche Wärme, indem eben Strahlungs- und Kaminverluste möglichst ausgeschlossen werden.

Betreffend Strahlungsenergie ist eine Verringerung wohl ausgeschlossen. Der Strahlungsverlust von 5 % ist typisch für unsere heutige Form des allgemein gebauten Koksofens mit vertikalen Zügen, und ist eine Verminderung ohne einen einschneidenden Eingriff in seine heutige bewährte Gestaltung ausgeschlossen. Außerdem ist aber eine Strahlung von 5 %, anderen Oefen im Hüttenbetriebe gegenübergestellt, als sehr günstig zu bezeichnen und kann man mit derselben wohl recht zufrieden sein.

Der Kaminverlust in seiner Höhe von 15 % ist noch etwas hoch. Der Grund hierfür liegt aber nicht in einer ungenügenden Regeneration, wie man fälschlich annehmen möchte, sondern in dem Umstande, daß es bei der Beheizung der Oefen mit unvorgewärmtem Koksofengas eben unmöglich ist, die Gesamtwärme der aus den Füchsen abziehenden Abgase der Verbrennungsluft allein zu übertragen. Es sollte daher zur Koksofenbeheizung möglichst Schwachgas Anwendung finden, das eine weitgehende Vorwärmung ohne Zersetzung verträgt. Zur Erläuterung dieses folgende kleine Betrachtung:



A, B sei die Wärmekapazität des Heizgases.

B, C sei die Wärmekapazität der entsprechenden Verbrennungsluftmenge.

A_1, C_1 sei die Wärmekapazität der verbrannten Abgase.

Ist A B nun ein Koksofengas, das nicht vorgewärmt ist, so kann nur die Verbrennungsluft B C Wärme der Abgase aufnehmen und entsprechend ihrer Wärmekapazität nur die Wärmemenge $B_1 C_1$. Die Wärme $A_1 B_1$ ginge durch den Kamin verloren. Würde A B ein Schwachgas sein, so würde sich im theoretischen Idealfall annähernd alle Wärme regenerieren lassen.

Der prozentuale Kaminverlust beim Koksofengas wäre $\frac{A_1 B_1}{A_1 C_1} \cdot 100\,\%$.

Ich gebe nun dem Heizgas einen Luftüberschuß von C D. In diesem Falle ließe sich die Wärme von $B_1 D_1$ regenerieren in B D. Prozentual ausgedrückt wären das $\frac{A_1 B_1}{A_1 D_1} \cdot 100\,\%$ Kaminverlust. Da $A_1 D_1$ größer als $A_1 C_1$ ist, so wäre demnach mit wachsendem Luftüberschuß der prozentuale Kaminverlust geringer. Die prozentuale Kaminverlusterniedrigung muß aber notgedrungen eine Erniedrigung der Eintrittstemperatur in den Kamin mit sich bringen. Trat ohne Luftüberschuß das Abgas mit einer Temperatur T_1 in den Kamin, so tritt es jetzt mit einer Temperatur T_2 in den Kamin. Da bei Luftüberschuß nach obigem T_2 kleiner als T_1 sein muß, so muß auch $A_1 B_1 \cdot T_2$ kleiner sein als $A_1 B_1 \cdot T_1$.

C. Durch evtl. Wiedergewinnung des im Verkokungsprozeß benötigten Wärmeverbrauchs.

Nach Obigem sind im Koks auf 1kg durchgesetzter nasser Kohle von 12 % Feuchtigkeit rd. 230 WE enthalten, die beim Löschen vernichtet werden. Würde es nun möglich sein, in einer besonders konstruierten Einrichtung den Koks bis auf etwa 150 ° abzukühlen und den erzeugten Dampf dann aufzufangen und ihn in einen Dampfkessel- akkumulator — siehe Taschenbuch Eisenhütte, Seite 412 — zu führen, so könnten auf diese Weise auf 1 kg nasse Kohle 0,3 kg Abdampf erzeugt werden zur Verwertung in Abdampfturbinen.

Bei einer Anlage mit einem Kohlendurchsatz von 700 t nasser Kohle (100 Koksöfen) täglich ergibt dies 210 000 kg Abdampf. Rechne ich einen Dampfverbrauch von 15 kg pro PSst, so erhielte ich eine zu erzielende Leistung von 140 000 PSst. Der Dampf würde demnach eine 5800-PS-Anlage betreiben können. Da aber das Kokslöschen auch bei großen Anlagen noch sehr intermittierend geschieht, so würde die Ausführung sicher noch große Schwierigkeiten bieten und nicht das obige Energieergebnis zeigen. Aber auch mit einem weiteren Verlust von 50 % gerechnet, ergäbe dies doch noch einen Energiegewinn, der erzielte Mißerfolge wieder ausgleichen würde.

Weiter wird ein großer Teil der Wärme den Abgasen einverleibt. Nach meinen Messungen fand ich auf 1 kg Kohle 146 WE.

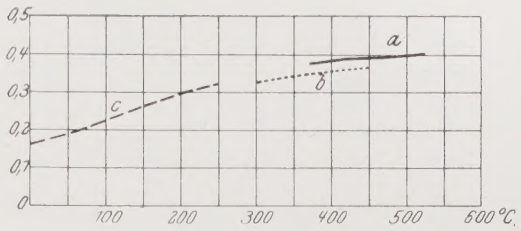
In Dampfform sind dies allein 0,12 kg auf 1 kg Kohle mit 12 % Feuchtigkeit. Die Frage ist nur: Wäre es möglich, die Abgase in eine isolierte Vorlage zu bringen, um Wärmeverluste möglichst zu vermeiden, den Dickteer hier durch Abkühlung mittels zugeführten Wassers teilweise auszuscheiden und dafür das zugeführte Wasser dem Gase einzuverleiben, um mit diesem noch stark verunreinigten Gase eine Turbine, die natürlich besonders konstruiert sein müßte, zu betreiben, durch die dann das Turbogebläse der Anlage betrieben werden könnte? Auf diese Weise wäre es möglich, das Gas mit der dem Rohgas innewohnenden eigenen Energie zu bewegen, ohne weitere äußere Energie zu benötigen.

Zum Schluß möchte ich noch auf eine mögliche Erhöhung der Gasenergie auf Kosten von Teerenergie, auf die mich meine Versuche brachten, hinweisen. In der Praxis fand ich durch Zersetzung der Teerdämpfe in den Gewölben des Ofens ein größeres Gasausbringen, als bei meinen Versuchen in dem elektrischen Ofen. Die für das kg Kohle insgesamt aufgewandte Verkokungswärme deckte sich hingegen in meinem elektrischen Ofen mit den Werten der Praxis (siehe Seite 26). Der erhöhte

Gasüberschuß erklärt sich also in der Praxis durch Zersetzung von Teerdämpfen. Ich möchte nun hier den Gedanken aussprechen, durch weitere Zersetzung von Teer eine weitere Erhöhung der Gasenergie zu erzielen. Dies könnte geschehen durch Einführen des in der Vorlage verdichteten Dickteers zurück in die Ofenkammer. Da die Zersetzung des Teers wärmeabgebend verläuft, würde ein weiterer Verbrauch an Wärme nicht nötig sein.

Alle diese Fragen sind aber schwer in einer kleinen Abhandlung zu erledigen. Der Zukunft muß man die evtl. technische Lösung überlassen. Zweck meiner Arbeit war nur, einige Klarheit in die Energieumsetzung beim Verkokungsprozeß zu bringen. Wie Verbesserungen und Ersparnisse an Energie zu gewinnen sind, wird die Zukunft zeigen, denn der Entwicklung der Technik kann man schwer den Weg vorschreiben. Schritt für Schritt arbeitet sie sich sachgemäß und langsam vorwärts, und dies hat auch sein Gutes.

Graphische Darstellung der spez. Wärme von Koks zu Seite 10.



a = von mir im elektr. Ofen gefundene,
b = nach Eisenhütte Seite 320,
c = nach Eisenhütte Seite 29.

Lebenslauf.

Geboren am 1. März 1887 zu Dahlhausen-Ruhr, besuchte ich zuerst die Elementarschule daselbst und dann das Gymnasium zu Hameln. Nach dort bestandenem Abiturium studierte ich ein Semester in Oxford und nach Erledigung meines Dienstjahres acht weitere Semester in Charlottenburg, wo ich im Herbst 1912 mein Diplom-Examen bestand.

Herrn Professor SIMMERSBACH, der mir die Anregung zu der vorliegenden Arbeit gab und mich bei der Ausführung mit Rat und Tat unterstützte, spreche ich hiermit meinen verbindlichsten Dank aus.

Auch allen Herren der Praxis, die durch Gewährung des Zutritts zu den Kokereien und durch ihr freundliches Entgegenkommen und ihre Ratschläge zur Förderung meiner Arbeit beigetragen haben, spreche ich an dieser Stelle meinen besten Dank aus.